



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA
SOLDA MAG APLICADA A AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA
LIGA**

Lucas Favaretto

Lajeado, dezembro de 2020



Lucas Favaretto

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA SOLDA MAG APLICADA A AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I, no Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC), da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Marcelo dos Santos Barretos

Lajeado, dezembro de 2020.

Lucas Favaretto

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA SOLDA MAG APLICADA A AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II – Monografia, do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel:

Professor: Msc. Marcelo dos Santos Barretos
(orientador)
Universidade do Vale do Taquari – Univates;

Examinador: Msc. Eduardo Becker Delwing
Universidade do Vale do Taquari – Univates;

Examinador: Dr. Lober Hermany
Universidade do Vale do Taquari - Univates.

Lajeado, dezembro de 2020.

RESUMO

A utilização de materiais que possibilitem a produção de produtos de alta qualidade aliada à redução de custos e maior produtividade tornou-se um grande foco das empresas proporcionando um aumento na competitividade. O aço representa um dos principais materiais de fabricação utilizados em indústrias automotivas na produção de componentes mecânicos. Neste cenário os aços microligados alcançam uma maior relevância, pois proporcionam importantes reduções de peso em estruturas de grande porte. Dentre os processos mais conhecidos para união de metais, destaca-se a soldagem por arco elétrico. Nas indústrias, dentre os processos de soldagem por arco elétrico mais empregados na união de aços microligados, está o processo MAG. Neste trabalho foram avaliadas de forma técnica as propriedades mecânicas de uma junta soldada pelo processo supracitado de aço NBR 6656 LNE 38. As amostras se deram por meio da soldagem de topo com a presença ou não do chanfro de face. Para avaliação e qualificação dos processos, bem como confecção dos corpos de prova, e procedimentos dos processos qualificativos, foram utilizados os critérios disponibilizados através do código ASME IX – *Boiler & Pressure Vessel Code*. Os procedimentos experimentais foram realizados por meio de ensaios mecânicos. Os resultados evidenciam grande presença de falhas oriundas do processo como presença de porosidade e mordeduras.

Palavras-chave: Soldagem MAG; Código ASME IX; ensaios mecânicos; Aço NBR 6656 LNE 38.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das ligas ferrosas	18
Figura 2 – Seção de perfil C utilizado em longarinas	24
Figura 3 – Aplicação típica de chassi para veículos pesados	25
Figura 4 – Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.	27
Figura 5 – Processo básico de soldagem GMAW	29
Figura 6 – Equipamentos para a soldagem manual	30
Figura 7 – Sistema para alimentação de arame no processo MIG.....	31
Figura 8 – Tocha MIG/MAG convencional.....	32
Figura 9 – Sistema de classificação para arame-eletrodo.....	34
Figura 10 – Requisitos de composição química para arame ou metal de solda.....	35
Figura 11 – Efeito tensão utilizada na penetração do cordão de solda	37
Figura 12 – Relação entre velocidade de alimentação e corrente de soldagem	38
Figura 13 – Ciclo térmico da soldagem	40
Figura 14 – Regiões de uma solda por fusão (esquemática)	41
Figura 15 – Representação esquemática do aparelho utilizado para ensaio de tração	41
Figura 16 – Corpo de prova para ensaio de tração	42

Figura 17 – Corpo de prova para ensaio de dobramento	43
Figura 18 – Fluxo experimental	46
Figura 19 – Guilhotina Hidráulica SORG SGH 68/40.....	47
Figura 20 - Corpo de prova com chanfro de face.....	49
Figura 21 – Soldagem mecanizada dos corpos de prova.....	49
Figura 22 – Distribuição de corpos de prova para realização de ensaios destrutivos.....	53
Figura 23 – Máquina de ensaio a tração Pantec, modelo VERSAT.....	54
Figura 24 – Dispositivo para ensaio de dobramento.....	55
Figura 25 – Equipamento para ensaio de dobramento.....	56
Figura 26 – Cortadora Metalográfica CM80.....	57
Figura 27 – Ensaio de LP em CP-01 a CP-05, lado A.....	59
Figura 28 - Ensaio de LP em CP-01 a CP-05, lado B.....	60
Figura 29 - Ensaio de LP em CP-06 a CP-10, lado A.....	61
Figura 30 - Ensaio de LP em CP-06 a CP-10, lado B.....	62
Figura 31 – Rompimento próximo a região soldada em ensaio de tração.....	63
Figura 32 – Corpos de prova com anomalias após ensaio de dobramento.....	65
Figura 33 – Surgimento de trinca próximo ao centro da solda.....	66
Figura 34 – Macrografia dos corpos de prova CP-01C a CP-05C.....	66
Figura 35 - Macrografia dos corpos de prova CP-06C a CP-10C.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de equivalência de norma para aços ARBL.....	21
Tabela 2 – Composição química de aços ARBL	22
Tabela 3 – Propriedades mecânicas de aços ARBL	23
Tabela 4 – Processos de soldagem por fusão	27
Tabela 5 – Gases e misturas empregados na soldagem MIG/MAG	33
Tabela 6 – Referência dos corpos de prova para soldagem.....	49
Tabela 7 – Referências dos corpos de prova para ensaios destrutivos.....	52
Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
AR	Argônio
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Association</i>
C	Carbono
CP	Corpo de Prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
H	Hidrogênio
HSLA	<i>High Stregnth Low Alloy</i>
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
N	Nitrogênio
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
O	Oxigênio

P	Fósforo
QW	Qualificação de Soldagem (<i>Qualification Welding</i>)
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SEW	<i>Stahl Eisen Werkstoffblatt</i>
Si	Silício
Ti	Titânio
TIG	Tungstênio Inerte Gás
V	Vanádio
ZTA	Zona Termicamente Afetada
δ	Alongamento
σ	Tensão de Engenharia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Tema	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Justificativa.....	14
1.4 Delimitação do trabalho.....	15
1.5 Estrutura do trabalho	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Ligas Ferrosas e classificação.....	17
2.2 Aços e classificação	18
2.3 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)	20
2.4 Aplicação do aço ARBL em veículos pesados	23
2.5 Processos de soldagem	25
2.5.1 Soldagem ao arco elétrico com gás de proteção	28
2.5.2 Equipamentos para soldagem ao arco elétrico com proteção.....	30
2.5.3 Gás de proteção	32
2.5.4 Arame-eletrodo.....	34
2.5.5 Influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão.....	36
2.6 Metalurgia da Soldagem	39
2.7 Ensaio de tração.....	41
2.8 Ensaio de dobramento guiado	42

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	44
3.1 Objeto de estudo	44
3.2 Tipo de pesquisa	45
3.3 ASME IX – Norma de qualificação para soldagem	45
4 DESENVOLVIMENTO	47
4.1 Metal base para soldagem.....	47
4.2 Obtenção dos corpos de prova.....	47
4.3 Preparação para soldagem dos corpos de prova.....	48
4.4 Procedimento de soldagem.....	49
4.5 Norma para avaliação dos corpos de prova	50
4.5.1 Ensaio visual por líquido penetrante.....	52
4.5.2 Ensaio de tração.....	53
4.5.3 Ensaio de dobramento.....	54
4.5.4 Ensaio macrográfico	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 Ensaio por líquido penetrante.....	58
5.2 Ensaio de tração.....	63
5.3 Ensaio de dobramento.....	65
5.4 Ensaio macrográfico	66
CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A obsessão das empresas em busca de produtos de alta qualidade, focando em redução de custos e maior produtividade, torna necessário o melhor entendimento de seus processos para que consigam uma maior relevância no mercado, destacando-se de seus concorrentes. A partir da compreensão dos materiais e variáveis envolvidas nos processos, é possível a fabricação de produtos mais competitivos, trazendo um diferencial às ofertas disponíveis no mercado.

No ramo metalmecânico, destacam-se as indústrias automobilísticas, que procuram a produção de peças mais leves mantendo as propriedades mecânicas necessárias. O emprego de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) na fabricação dessas peças cresce a cada ano pelas suas características interessantes a esse tipo de aplicação.

Chapas de aço ARBL são usualmente utilizadas em projetos de peças que são submetidas a um grande esforço, evitando um possível aumento de peso. Na fabricação de componentes de veículos pesados são utilizadas chapas grossas de aço ARBL que são consideradas a partir de 6mm de espessura.

Dentre os processos utilizados na sua manufatura, destaca-se o processo de soldagem por gás ativo MAG (Metal Active Gas). Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992) sua alta produtividade torna-se um diferencial quando comparado a outros métodos, fazendo com que seja empregado tanto em pequenas empresas quanto a grandes indústrias.

Segundo Avila e Bracarense (2017), para verificação da qualidade de juntas soldadas devem ser verificados os parâmetros utilizados na realização do processo e realizados ensaios mecânicos para obtenção de resultados quantitativos.

Na empresa onde realiza-se este trabalho, utiliza-se o aço NBR 6656 LNE 38 como metal base aliado ao processo de soldagem MAG para o alongamento de chassi rodoviário. Este processo pode ser realizado juntamente com a fabricação de implementos rodoviários visando um aumento no comprimento do chassi, através de solda realizada na longarina do veículo.

Dentro deste contexto, este trabalho pretende validar o processo de soldagem aplicado ao alongamento de chassi rodoviário, a partir de procedimentos técnicos, a fim de comparar as propriedades mecânicas do material base com o material soldado, contribuindo com a redução de falhas causadas no processo de união.

1.1 Tema

O tema do trabalho está relacionado com a avaliação das propriedades mecânicas de um aço de alta resistência e baixa liga soldado pelo processo MAG.

1.2 Objetivos

A seguir, o objetivo geral e os específicos:

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho consiste na avaliação das propriedades mecânicas de uma junta soldada de aço ARBL, pelo processo MAG, visando avaliar as

propriedades resultantes do processo investigando os parâmetros utilizados e realizando ensaios mecânicos, a partir de referencial técnico específico.

1.2.2 Objetivos específicos

São designados como objetivos específicos do trabalho:

- Confeccionar corpos de prova unidos por solda e realizar ensaios conforme especificações técnicas determinadas pelo ASME IX;
- Verificar as propriedades dos corpos de prova em relação a resistência mecânica a tração, ductilidade e homogeneidade estrutural;
- Analisar a influência da geometria de junta soldada, realizando o processo das amostras com a presença ou não de chanfro de face;
- Avaliar se o processo está adequado e satisfaz as condições necessárias para realização do alongamento de chassi.

1.3 Justificativa

O processo de soldagem utilizado nas indústrias é afetado por diversos parâmetros durante sua execução, tornando-se difícil de controlar e avaliar. Conforme Silva et al. (2019), a soldagem não é um método que possibilita previsão absoluta de seu resultado, podendo impactar negativamente na vida útil de determinado produto caso não ocorra conforme o esperado. Desta forma, a avaliação deste processo dentro da indústria torna-se essencial para garantir a confiabilidade dos produtos.

O estabelecimento de critérios para avaliação do processo de alongamento de chassi rodoviário se faz necessário, visto que uma junta soldada defeituosa pode contribuir com o surgimento de falhas, tornando necessário retrabalhos que geram um aumento de custos que poderiam ser evitados.

Também é válido acrescentar que o estudo pode contribuir agregando dados técnicos no ramo da engenharia, uma vez que o assunto se faz pouco presente na

literatura nacional, porém, trata de processos amplamente utilizados na manufatura de diversos produtos na indústria metalmecânica.

1.4 Delimitação do trabalho

O presente estudo foi realizado a partir da soldagem manual pelo processo MAG, sendo realizado em amostras de chapa de aço NBR 6656 LNE 38 de espessura de 6,30mm.

Com a preparação dos corpos de prova a partir dos parâmetros selecionados pretende-se:

- Analisar as propriedades mecânicas das juntas soldadas a partir de ensaios;
- Qualificar os corpos de prova relacionando os resultados obtidos com os parâmetros utilizados;
- Selecionar o procedimento mais eficiente;
- Relacionar os resultados obtidos

As amostras e os corpos de prova foram realizados dentro das instalações de uma empresa do setor metalmecânico fabricante de carrocerias rodoviárias.

Os ensaios mecânicos serão realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade do Vale do Taquari, localizada em Lajeado, no estado do Rio Grande do Sul.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo sobre a introdução do estudo, apresentando o tema do trabalho, objetivos gerais e

específicos, justificativa e delimitação do trabalho. Na segunda parte, o capítulo dois trata sobre a revisão literária acerca do assunto abordado, revisando a bibliografia sobre os tópicos, procurando uma maior compreensão dos conteúdos utilizados no estudo. O capítulo três apresenta os métodos e materiais utilizados nos experimentos realizados. No quarto capítulo, avalia-se os resultados e propostas para trabalhos futuros sobre o mesmo tema. No quinto capítulo apresentam-se as considerações finais sobre o estudo elaborado e enfim as referências bibliográficas usadas para elaborar o trabalho.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Ligas Ferrosas e classificação

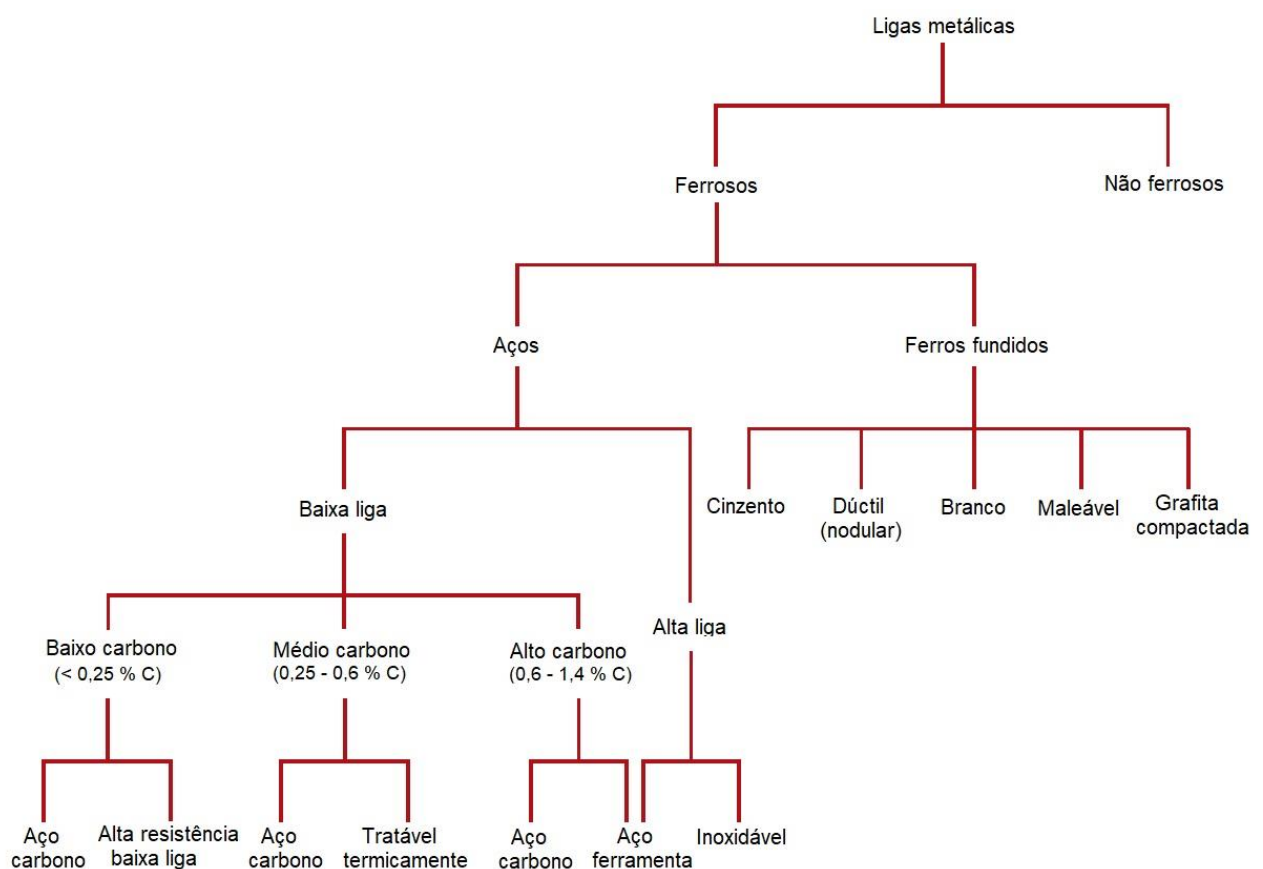
Conforme Callister (2011), consideram-se ligas ferrosas as quais o ferro é o principal componente. Estas ligas são altamente difundidas devido a três fatores: abundância de matéria prima presente na crosta terrestre; técnicas relativamente econômicas de extração, refino, inclusão de elementos de liga e fabricação; alta versatilidade possibilitando uma grande faixa de propriedades mecânicas e físicas.

As ligas ferrosas dividem-se em ferros fundidos e aços, e a principal diferença entre elas é a composição química. Enquanto o ferro fundido possui concentração de carbono acima de 2,1 % em peso e presença considerável de silício, o aço contém menos de 2,1 % de carbono e uma quantidade mínima de silício. A figura 1 apresenta um esquema de classificação para as ligas ferrosas. Colpaert (2008) afirma que quando adicionado ao ferro, o carbono forma um carboneto extremamente duro, conhecido na terminologia metalográfica por cementita. Por este motivo, quanto maior for o teor de carbono, maior será a quantidade de cementita presente e mais dura a liga metálica. Desta forma, em geral, caracteriza-se o ferro fundido como um material de alta dureza e baixa resistência ao impacto, enquanto o aço, por possuir um menor teor de carbono, torna-se mais dúctil e tenaz, possibilitando sua deformação plástica.

Quanto a aplicação de cada material, deve-se considerar os esforços que a peça final deverá suportar para selecionar a liga ideal. Chiaverini (2005) afirma que o emprego do ferro fundido se deve ao fato da possibilidade de produzir peças de grande

diversidade de formas e dimensões, com resistência e tenacidade razoável a um custo consideravelmente baixo. Devido ao processo de fundição, é frequente a presença de defeitos superficiais ou internos na peça final. O aço, devido ao trabalho mecânico e controle microestrutural durante seu processo de fabricação, possui propriedades mecânicas finais melhores do que os ferro fundidos, sendo aplicado em diversos dos mais importantes artigos siderúrgicos, como chapas, fitas, fios etc. A figura 1 demonstra a classificação das ligas metálicas.

Figura 1 – Classificação das ligas ferrosas



Fonte: Adaptado pelo autor, baseado em Callister (2011).

2.2 Aços e classificação

Segundo Chiaverini (2005), o aço pode ser determinado como uma liga ferro-carbono composta de normalmente 0,008% até 2,11 % de carbono, além de elementos residuais consequentes do processo de fabricação. O limite de 0,008%

representa a solubilidade máxima do carbono no ferro considerando-se temperatura ambiente, enquanto o limite superior de 2,11 % refere-se à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro a 1140°C.

Os aços podem ser classificados em função da sua composição como aços-carbono e aços-liga. O aço-carbono é subdividido conforme sua concentração de carbono, formando três diferentes grupos, sendo eles: aços de baixo teor de carbono, aços de médio teor de carbono e aços de alto teor de carbono. Já os aços-liga usualmente classificam-se analisando as concentrações de elementos de liga: aços de baixo teor de liga e aços de alto teor de liga. O aço-liga é um aço-carbono que se compõe de outros elementos de liga em concentrações além dos que são considerados normais (CALLISTER, 2011).

Conforme Callister (2011), a maioria dos aços produzidos se classificam como de baixo carbono. A concentração de carbono nestes aços é inferior a 0,25% e a microestrutura característica consiste em ferrita e perlita, apresentando baixa resistência mecânica, porém alta ductilidade e tenacidade. Seu limite de escoamento situa-se geralmente em 275 Mpa, enquanto o limite de resistência a tração concentra-se em torno de 415 a 550 Mpa e ductilidade de 25 %. Os aços de baixo carbono são, dentre todos os aços, os mais baratos de produzir, sendo aplicados em formas estruturais, chapas para tubulações, carcaças de automóveis etc.

Os aços de médio carbono possuem entre 0,25 % e 0,60 % de concentração de carbono. Estas ligas são normalmente encontradas com a microestrutura de martensita revenida resultante dos processos de tratamento térmico empregados para obter melhores propriedades mecânicas. Em geral as ligas de médio carbono são mais resistentes que os aços de baixo carbono, porém com uma perda de ductilidade e tenacidade. Estes aços são utilizados em engrenagens, virabrequins, rodas e outros componentes estruturais que necessitam de alta resistência mecânica (CALLISTER, 2011).

Já os aços de alto carbono são compostos de uma quantidade considerável de carbono variando entre 0,60 % e 1,4 %, são os mais duros e com maior resistência mecânica, porém perdem em ductilidade quando comparado aos aços com menos carbono. Geralmente são utilizados como temperados e revenidos, gerando um aumento na resistência a abrasão e desgaste. Os aços empregados na fabricação de

ferramentas e matrizes são aços alto-carbono usualmente contendo cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio, formando uma liga de alta dureza e alta resistência. Estes aços são encontrados em ferramentas de corte, facas, navalhas, e arames de alta resistência mecânica (CALLISTER, 2011).

Quanto aos elementos de liga, os aços de baixa-liga contêm elementos, além do carbono, em teores totais menores que 8 %, enquanto um aço de alta-liga possui um teor de elementos de liga acima de 8 %. No grupo de aços de baixo carbono e baixa liga destacam-se os aços ARBL. Nos aços ARBL os elementos de liga usualmente adicionados são níquel, vanádio, cobre, molibdênio, entre outros, em concentrações específicas a fim de atingir maiores resistências mecânicas que os aços comuns de baixo teor de carbono.

2.3 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)

Conforme ASM (2001), um dos primeiros aços de Alta Resistência e Baixa Liga conhecido pela sigla ARBL (ou HSLA – *High Strength Low Alloy*- em inglês) foi apresentado com a denominação de COR-TEN (marca da *USX Corporation*) por volta de 1930 nos Estados Unidos. Quando comparados aos aços utilizados na época, eles possuíam uma resistência mecânica cinco vezes maiores, sendo muito aplicados na manufatura de tanques de armazenagem de gás e petróleo. Além disso, os aços ARBL eram empregados na indústria automobilística e na construção de embarcações, pontes e equipamentos para a agricultura.

Na década de 70, devido à crise do petróleo, a indústria automobilística procurou desenvolver novos materiais, visando principalmente a redução de peso nos veículos. Segundo Perini (2008), ganhos em redução de massa e segurança se tornaram os principais objetivos dos projetistas e engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento de novos produtos.

Para a fabricação de aços, existem normas e requisitos que devem ser seguidos, referindo-se principalmente a propriedades mecânicas e químicas. Na tabela 1 pode-se verificar a equivalência entre diversas normas para alguns aços

ARBL. Para este estudo adotaram-se as diretrizes da norma NBR 6656:2008 e o aço avaliado foi o LNE 38.

Tabela 1 – Tabela de equivalência de norma para aços ARBL

ABNT NBR 6656:1992	ABNT NBR 6656:2008	DIN 1623 P.2	DIN EN 10149-2	ASTM A 715/98	SAE J 1392/89	SEW 092
LNE 38	LNE 380	ST 50-2	S 355 MC	-	050 Y	QStE 380 TM
-	LNE 420	ST 50-2	S 420 MC	Gr 60	060 X	QStE 400 TM
-	LNE 460	ST 52-3	S 460 MC	-	060 Y	QStE 460 TM
LNE 50	LNE 500	ST 52-3	S 500 MC	Gr 70	070 X, Y	QStE 500 TM
-	LNE 550	ST 60-2	S 550 MC	Gr 80	080 X	QStE 550 TM
LNE 60	LNE 600	ST 60-2	S 600 MC	-	080 X, Y	

Fonte: Adaptado pelo autor, com base em ARMCO (2011).

As ligas metálicas são constituídas pela combinação de dois ou mais materiais, dos quais, no mínimo um é metal. As ligas são formadas por elementos de liga, que são elementos químicos capazes de promover alterações na microestrutura do material, obtendo desta forma melhorias nas propriedades mecânicas.

Segundo ASM (2001), os aços ARBL possuem composição química desenvolvida especificamente para garantir altos valores de propriedades mecânicas. São distintos dos aços de alta liga pois apresentam baixos teores de elementos de liga em sua composição, tendo seu desenvolvimento com maior destaque nas propriedades mecânicas e não na composição química. Os elementos de liga geralmente adicionados a este tipo de aço são: Ni, Cr, Cu, Ti, Si, Mn.

Matlock (2009) afirma que nesta classe de aços a quantidade de elementos ligantes geralmente não ultrapassam 2% e a concentração de carbono encontra-se abaixo de 0,25%. As quantidades de elementos são muito inferiores a outras categorias, como aços ferramenta ou aços inoxidáveis. Segundo William (1981), em virtude do baixo teor de carbono os aços ARBL apresentam excelente soldabilidade.

As composições químicas presentes nestes materiais podem variar muito devido ao tipo de funcionalidade, propriedades necessárias e processos aplicados na fabricação dos mesmos (KEELER; KMICHI, 2014).

A tabela 2 indica a composição química de aços de alta resistência e baixa liga segundo ABNT NBR 6656:2008.

Tabela 2 – Composição química de aços ARBL

Grau	Composição Química (% Peso)								
	C % máx.	Mn % máx.	Si % máx.	P % máx.	S % máx.	Al % mín.	Nb % máx.	V % máx.	Ti % máx.
LNE 380	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
LNE 420	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15
LNE 460	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15
LNE 500	0,12	1,50	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
LNE 550	0,12	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
LNE 600	0,15	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20

Fonte: ABNT NBR 6656:2008

O principal elemento de liga presente nos aços é o Carbono (C), que influencia diretamente no acréscimo de resistência e dureza, e queda da ductilidade. O manganês (Mn) é responsável pela diminuição das temperaturas de transformação e endurecimento por solução sólida promovendo uma combinação de dureza, resistência mecânica e ductilidade. O Silício (Si) é capaz de aumentar a resistência mecânica e assim como o Alumínio (Al), possui função desoxidante (CHIAVERINI, 2005).

Kou (2003) afirma que o Nióbio (Nb), Vanádio (V) e Titânio (Ti) contribuem para o refino de grão bem como endurecimento por precipitação, promovendo um elevado refino de grão ferrítico e precipitação de carbonetos, carbonitreto e/ou nitreto na ferrita e/ou na martensita.

Os aços ARBL são utilizados principalmente na condição como laminado ou normalizados, processos essenciais para o desenvolvimento das propriedades mecânicas finais. O controle de taxas de nucleação e crescimento nos processos de recristalização é realizado pelo processo de laminação controlado, refinando a microestrutura pelo rigoroso monitoramento de temperatura e outros parâmetros do processo (KOU, 2003).

Na tabela 3 apresentam-se as propriedades mecânicas de aços ARBL conforme a norma ABNT NBR 6656:2008.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de aços ARBL

Grau	Tensão de Escoamento σ_{esc} (MPa)	Tensão Máxima $\sigma_{máx}$ (MPa)	Alongamento mínimo δ (%)
LNE 380	380 a 530	460 a 600	23
LNE 420	420 a 540	520 a 650	22
LNE 460	460 a 580	540 a 680	18
LNE 500	500 a 620	560 a 700	18
LNE 550	550 a 670	600 a 760	15
LNE 600	600 a 720	680 a 810	14

Fonte: ABNT NBR 6656:2008

O alongamento mínimo (δ) refere-se o alongamento percentual depois da ruptura do corpo de prova quando submetido ao ensaio de tração.

Segundo Tian et al. (2017), os aços ARBL representam um alto volume de produção (aproximadamente 10% da produção de aço no mundo) devido a sua alta variedade de propriedades mecânicas considerando um custo de produção relativamente baixo. O aço ARBL é popularmente utilizado para substituir o aço convencional, permitindo uma redução de espessura e consequente diminuição de peso.

Fairchild et al. (2003) adiciona que a utilização de aços ARBL possibilitaram o desenvolvimento de novas estruturas, visto que estas anteriormente não poderiam ser fabricadas devido ao peso excessivo de material presente no projeto.

Na indústria automobilística, dentre as diversas aplicações, os aços ARBL são empregados na fabricação de chassis de veículos pesados. Segundo os fabricantes, o material é empregado na fabricação das longarinas do veículo, um dos principais componentes responsáveis por suportar o peso das cargas carregadas.

2.4 Aplicação do aço ARBL em veículos pesados

Com a constante busca de novas matérias-primas visando principalmente a redução de peso, a indústria automobilística procura novos materiais que proporcionem uma redução de seção conservando as propriedades mecânicas. Além

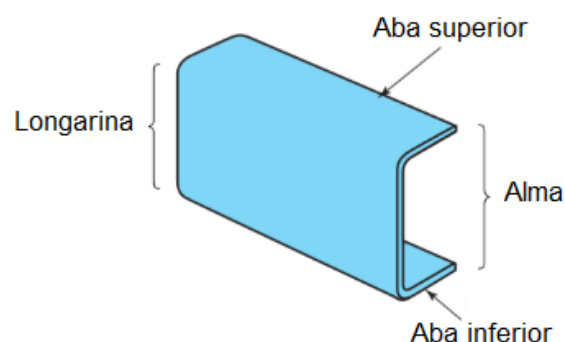
de questões econômicas, pressão ambiental e alto preço de combustíveis, existe também a “Lei da Balança” que restringe um limite máximo de peso e dimensão para cada modelo de caminhão poder transitar pelas rodovias do país. Essa lei faz com que os proprietários de veículos pesados e implementos prefiram adquirir produtos cada vez mais leves, podendo assim, carregar mais carga gerando um maior lucro por quilômetro rodado (ALFREDO, 2009).

Segundo Singh, Ohji e Asthana (2016), o chassi e a estrutura do veículo são submetidos a grandes esforços estáticos e dinâmicos e estes componentes exigem operações de soldagem em sua função, desta forma, o aço de baixo carbono de alta resistência e baixa liga é geralmente o material preferido pelos fabricantes. Além disso, o material necessita de uma boa taxa de alongamento pois geralmente passa por processos como corte a plasma, dobramento, estampagem, furação, entre outros.

Kim et al. (2015) adiciona que as chapas metálicas de aços de alta resistência e baixa liga são aplicados em chassis automotivos e de veículos pesados na condição de laminados a quente. Sua produção é associada a precipitados finos como TiC e NbC, obtendo assim alta resistência e ductilidade.

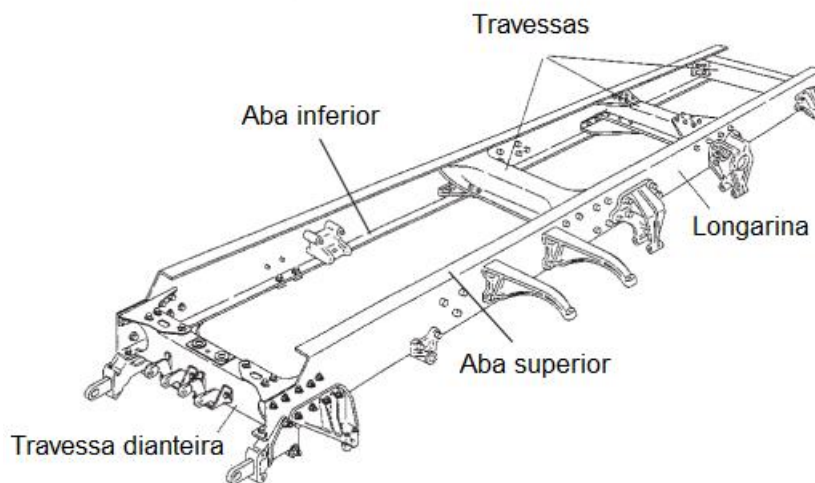
Para diminuição do peso estrutural, as chapas metálicas são dispostas na forma de seções de vários formatos, tais como estruturas em forma de C, U, I, H etc. Nos veículos pesados as longarinas são chapas metálicas dobradas em forma de C. As figuras 2 e 3 ilustram o perfil utilizado nas longarinas e o chassi tipicamente aplicado em veículos pesados.

Figura 2 – Seção de perfil C utilizado em longarinas



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em Bennett e Norman (2011).

Figura 3 – Aplicação típica de chassi para veículos pesados



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em Bennett e Norman (2011).

2.5 - Processos de soldagem

Wainer, Brandi e Mello (1992) definem soldagem como a união de duas partes metálicas a partir de fornecimento de calor, relacionado ou não com o emprego de pressão. Este processo teve um grande crescimento durante a II Guerra Mundial, em razão da necessidade de métodos de fabricação para junção de chapas metálicas, contudo, o arco elétrico foi apresentado apenas no século XIX.

Conforme descrito no AWS WELDING HANDBOOK, soldagem é a técnica de unir duas ou mais partes, proporcionando entre elas a continuidade e as características químicas e mecânicas do material (AWS, 1991; MOREIRA, 2008).

Entre os processos de união de materiais, a soldagem destaca-se principalmente devido ao seu largo emprego e suas versatilidades. Os processos de soldagem possibilitam a obtenção de excelentes propriedades mecânicas em metais e ligas metálicas com um processo relativamente econômico utilizando ou não a adição de material (MACHADO, 2007).

Atualmente, com o aumento de exigências em segurança e consequente desenvolvimento dos processos de fabricação, a utilização das juntas soldadas requer maior responsabilidade, solicitando uma maior confiabilidade nos processos

realizados. Qualquer erro de projeto ou de execução durante o processo de solda pode colocar pessoas em risco e gerar grandes perdas econômicas (RODRIGUES, 2012). Mesmo assim, o processo de soldagem destaca-se como dominante em diversas indústrias de fabricação, como a indústria de fabricação de implementos rodoviários, pois podem ser realizados com robôs ou outros equipamentos automatizados.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de soldagem dependem da relação de três importantes áreas: projeto de equipamentos soldados, produção e melhoria dos equipamentos de soldagem e desenvolvimento de materiais com apropriada soldabilidade. Os processos de soldagem estão em constante evolução pois pouco adianta produzir um novo material sem que ele proporcione atingir boa soldabilidade.

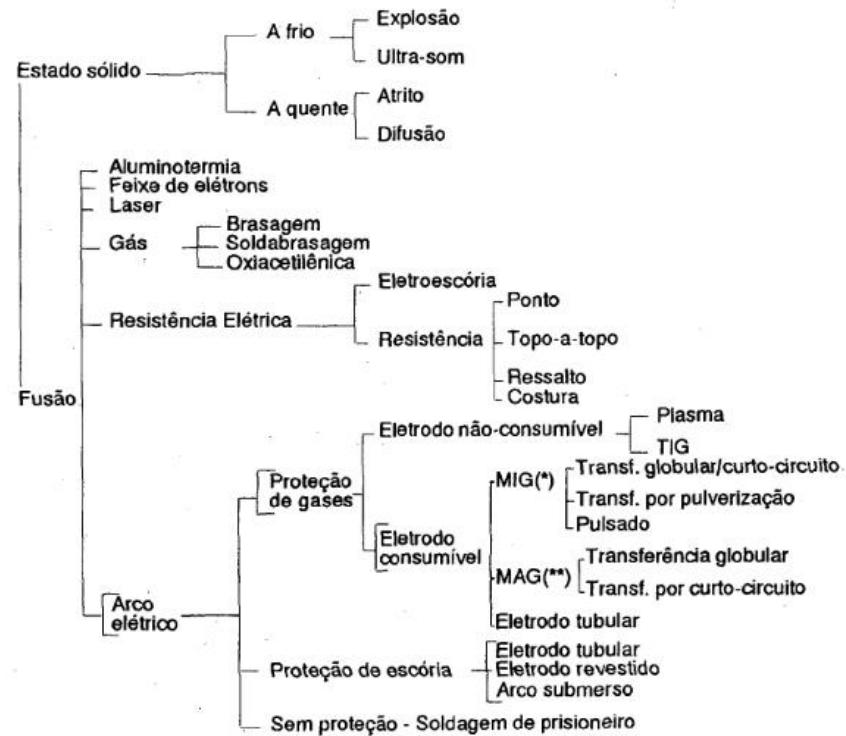
Segundo Machado (2007), todo processo de união deve preencher os seguintes requisitos mínimos:

- Fornecer energia necessária para realizar a união dos materiais (por fusão, pressão, difusão etc.);
- Possuir mecanismos de remoção de contaminação das superfícies a serem unidas;
- Prevenir a contaminação atmosférica;
- Permitir o controle de mecanismos e fenômenos envolvidos.

Nos processos de soldagem realizados por fusão, ocorre a formação da poça de fusão, a qual acontece devido ao deslocamento da fonte de energia e apresenta como fronteira a isoterma dada pela temperatura de solidificação do metal envolvido. Entretanto é possível realizar a solda sem fusão dos materiais envolvidos. Na figura 4 é possível visualizar os processos de soldagem a partir da natureza da união.

O processo que irá embasar o estudo presente neste trabalho é a soldagem por fusão MAG. Em virtude da grande variedade de processos de soldagem por fusão, estes são normalmente separados em subgrupos. A tabela 4 apresenta alguns processos de soldagem por fusão e suas principais características. Dentre os processos de soldagem por fusão, são mais aplicados industrialmente aqueles que utilizam o arco elétrico para fonte de energia (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 4 – Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união



Observ.: (*) com argônio ou hélio.

(**) com argônio, oxigênio, CO₂ ou misturas desses gases.

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

Tabela 4 – Processos de soldagem por fusão

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo positivo	Escória e gases gerados	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo positivo ou negativo	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo positivo	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO ₂	Fluxo contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semiautomático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas.

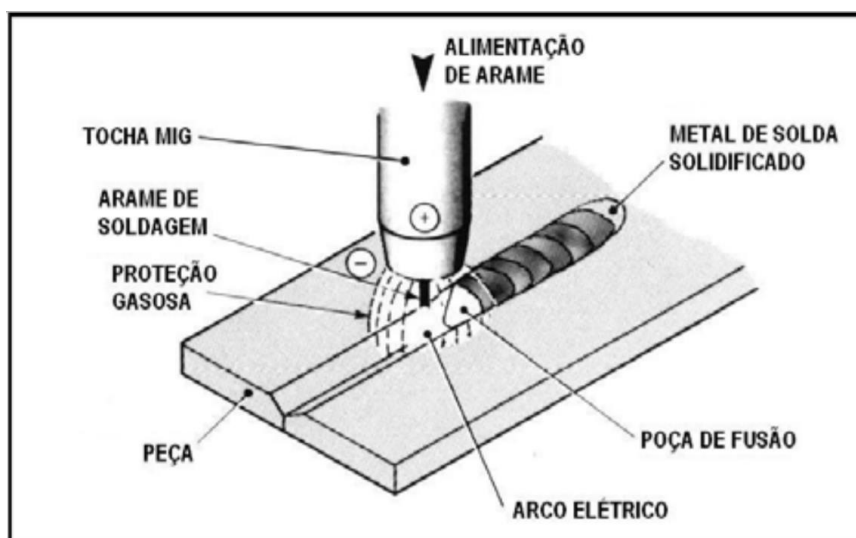
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo positivo	Argônio ou Hélio (MIG), Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₂ (MAG)	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas etc. Realizado em qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo negativo	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz.
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo negativo	Argônio, Hélio ou mistura destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6mm. Soldagem de não ferrosos e aço inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta tensão. Peça positiva	Vácuo (>>10 ⁻⁴ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Utilizado em indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial e corte de materiais não metálicos.
Soldagem a Gás	Chama oxiacetilênica		Gás (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

Fonte: Adaptado pelo autor, com base em Modenesi; Marques e Santos (2012).

2.5.1 Soldagem ao arco elétrico com gás de proteção

No processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa o aquecimento de peças metálicas é realizado com base em um arco elétrico formado entre um eletrodo metálico nu e o material de trabalho. O arco funde constantemente o arame conforme este é inserido à poça de fusão. A área da solda é protegida por um gás ou uma mistura de gases, ativos ou inertes. O processo conhecido como MIG (Metal Inert Gas) é protegido por gases inertes e MAG (Metal Active Gas) quando o gás utilizado é ativo (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). Estes processos também são denominados como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). A ilustração do processo pode ser verificada na figura 5.

Figura 5 – Processo básico de soldagem GMAW



Fonte: Fortes (2005)

O início da soldagem acontece no momento que ocorre o contato da ponta do arame com a peça, desta forma, mantendo o contato, aciona-se o gatilho de ignição da tocha energizando o arame e o gás começa a fluir (devido à abertura do solenoide). Em seguida pode-se iniciar o deslocamento da tocha para a soldagem (MACHADO, 2007).

A soldagem MIG/MAG pode ser realizada em uma extensa faixa de espessura, tanto em materiais ferrosos da mesma forma que não ferrosos. O eletrodo, também chamado de arame, é utilizado em diâmetros que variam normalmente entre 0,8 e 2,4mm. A soldagem MIG pode ser realizada na soldagem de ferrosos e não ferrosos, como alumínio, magnésio, cobre, níquel e suas ligas, enquanto o processo MAG é aplicado somente para materiais ferrosos, possuindo como gás de proteção da área de soldagem o Dióxido de Carbono (CO_2), ou misturas ricas neste gás (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992), os principais benefícios da soldagem MIG/MAG quando comparada à utilização de eletrodos revestidos são: elevada taxa de deposição, eletrodo alimentado continuamente, pode ser realizada em todas as posições, elevada velocidade de soldagem, ausência de procedimentos de retirada de escória e limpeza, e exigência de menor capacidade do soldador. Segundo Machado (2007), suas principais aplicações estão concentradas em soldagem de ligas

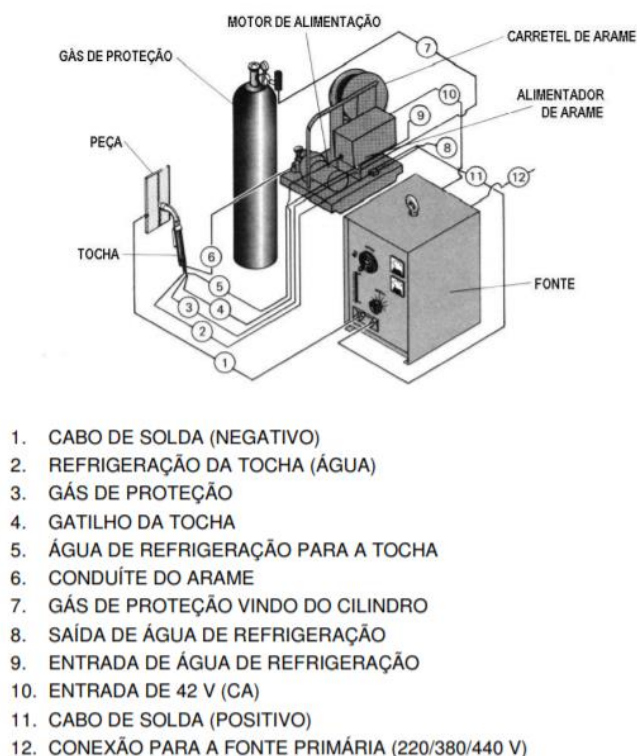
ferrosas e não ferrosas, soldagem de estruturas de automóveis, carrocerias e soldagem de tubulações.

Quanto às limitações do processo, Machado (2007) afirma que para realização da soldagem GMAW são necessários equipamentos relativamente caros e complexos, a proteção do arco é vulnerável a correntes de ar, podem ocorrer dificuldades quanto a soldagem de juntas de acesso restrito e pode gerar uma elevada quantidade de respingos.

2.5.2 Equipamentos para soldagem ao arco elétrico com proteção

Os equipamentos básicos necessários para realização do processo com arco elétrico de forma manual, são uma fonte de energia, o alimentador de arame (para impulsionar o arame no sentido da tocha), uma tocha de soldagem (onde serão direcionados os componentes do sistema de alimentação) e alimentação de gás de proteção, incluindo um regulador de pressão e fluxômetro (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). A figura 6 apresenta estes equipamentos:

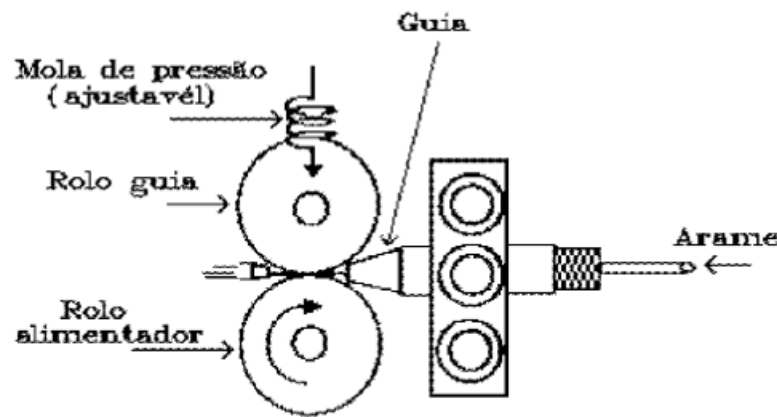
Figura 6 – Equipamentos para a soldagem manual



Fonte: Fortes (2005)

Um dos principais componentes é o responsável pela alimentação do arame, pois ele deve suprir o arame de forma constante garantindo a qualidade da soldagem. Em grande parte das aplicações o arame é alimentado pela ação de rolos que tracionam o fio como mostrado na figura 7. Além disso, a constante alimentação influencia diretamente na corrente requerida no processo.

Figura 7 – Sistema para alimentação de arame no processo MIG



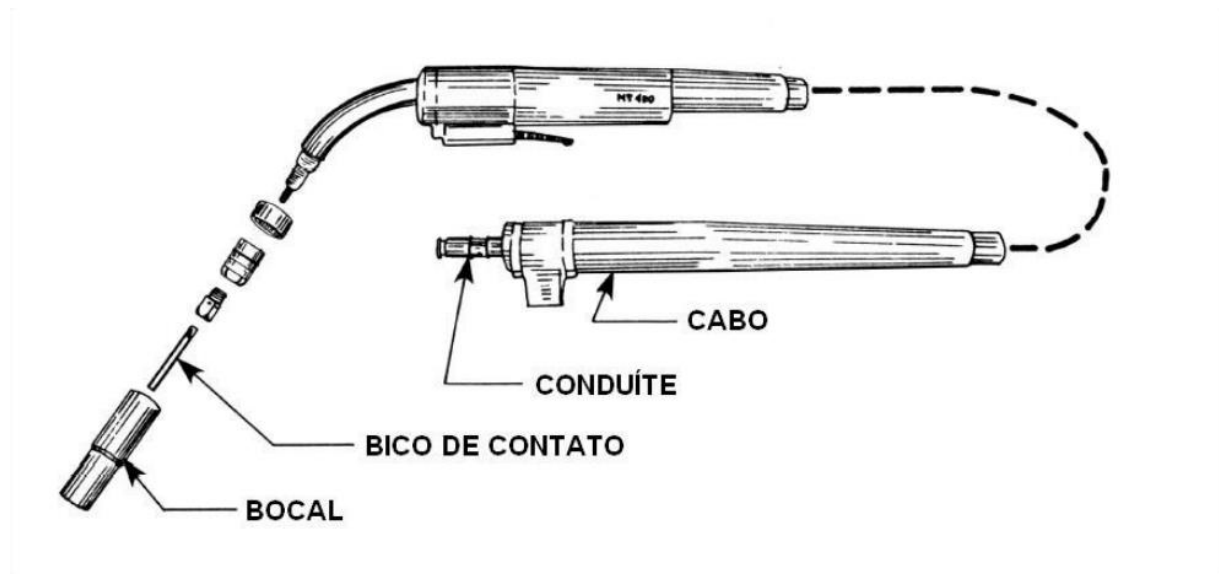
Fonte: Machado (2007)

Nesse sistema o arame pode ser empurrado pelos rolos ou puxado. Quando o arame é empurrado, podem ocorrer problemas como amassamento do arame (principalmente em metais muito dúcteis, como alumínio) e dificuldade para manter a alimentação constante. No sistema do tipo “puxa” o arame permanece tracionado e os rolos se encontram muito próximos ou até mesmo conectados à tocha, empurrando o consumível apenas no bico de contato. As desvantagens deste sistema estão relacionadas com um aumento de peso na tocha e caso a bobina de arame esteja afastada da tocha, será necessário um grande torque no motor tracionador (MACHADO, 2007).

A tocha de soldagem é responsável por guiar o arame eletrodo e o gás de proteção para o ponto de soldagem, além da energia necessária para o processo. Existem diferentes tipos de tocha desenvolvidos para diversas aplicações. Encontram-

se tochas para ciclos pesados de trabalho para altas correntes, até tochas mais leves e mais práticas aplicadas em baixas correntes e soldagem fora de posição. Nos dois casos é possível que a tocha seja refrigerada a água ou seca (refrigerada pelo gás de proteção) (FORTES, 2005). A figura 8 ilustra as principais partes de uma tocha seca convencional (refrigerada pelo gás) com extremidade curva.

Figura 8 – Tocha MIG/MAG convencional



Fonte: Fortes (2005)

O bico de contato é um tubo composto a base de cobre, onde o diâmetro interno é levemente superior ao diâmetro do arame eletrodo, e tem a função de contato elétrico deslizante. O bocal deve ser selecionado conforme a corrente e fluxo de gás da aplicação, e é feito de cobre ou material cerâmico. O gatilho de acionamento quando pressionado, energiza o circuito de soldagem, assim como ativa o alimentador de arame juntamente com uma válvula solenoide, que comanda o fluxo de gás protetor da tocha (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.5.3 Gás de proteção

O gás de proteção, conforme já citado anteriormente, é responsável pela proteção da região de soldagem. Fortes (2005), afirma que a contaminação presente na poça de fusão é causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor

d'água (H_2O) presentes na atmosfera. O nitrogênio, por exemplo, pode reduzir a tenacidade e ductilidade do aço, podendo levar à fissuração.

O tipo de gás de proteção utilizado pode interferir nas características do arco elétrico, modo de transferência de metal, penetração, dimensões e formato do cordão de solda, probabilidade de aparecimento de mordeduras e o custo envolvido na operação. Os gases inertes puros são aplicados basicamente na soldagem de metais não ferrosos, como alumínio, magnésio e titânio. Poucas quantidades de gases ativos (que possuem oxigênio) são aplicados na soldagem de ferrosos, melhorando a estabilidade do arco (a presença de óxidos facilita a emissão de elétrons) e a transferência de metal. Os custos do processo de soldagem de aços carbono e de baixa liga pode ser reduzido com o uso de CO_2 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Os gases e suas principais misturas aplicados na soldagem MIG/MAG são ilustrados na tabela 5:

Tabela 5 – Gases e misturas empregados na soldagem MIG/MAG

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20 - 50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	—	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20-30% N_2	---	Idem N_2 , mas melhor que 100% N_2
Ar + 1 - 2% O_2	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 - 5% O_2	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO_2	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO_2	Oxidante	Aços
Ar + CO_2 + O_2	Oxidante	Aços

Fonte: Marques; Modenesi e Bracarense (2009)

Neste estudo será abordada apenas a mistura AR + CO_2 pois será utilizado na aplicação deste trabalho.

- Argônio + CO_2 - As misturas de argônio-dióxido de carbono são aplicadas principalmente na soldagem de aços carbono e de baixa liga

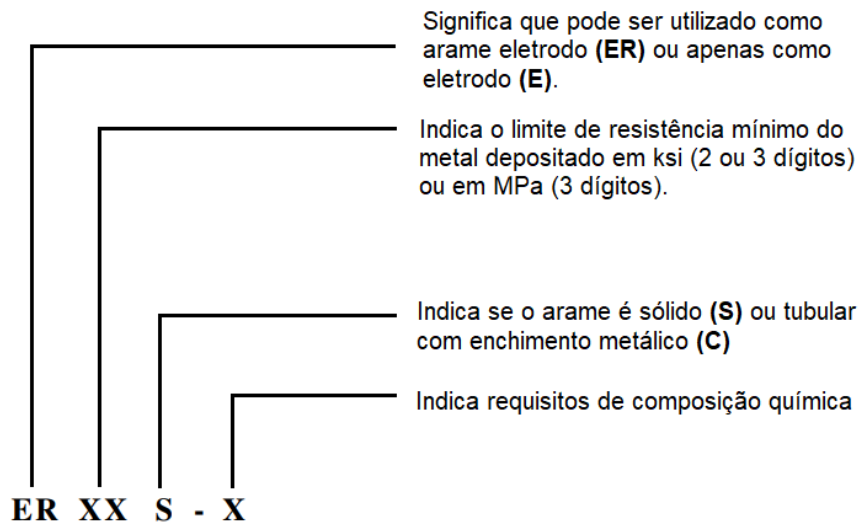
e com algumas restrições em aços inoxidáveis. Esta mistura apresenta uma diminuição de respingos normalmente presentes com o CO₂ puro e melhor desempenho na soldagem a baixa corrente e tensão. Para realização de uma transferência de metal estável em aressol, o gás deve ter uma corrente ligeiramente maior do que no argônio puro (FORTES, 2005). Para chapas grossas, utiliza-se normalmente a mistura entre 18 a 25% de CO₂.

2.5.4 Arame-eletrodo

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), os arames aplicados na soldagem devem possuir composição química, dureza e dimensões altamente controlados e são constituídos de metais ou ligas metálicas. Arames de qualidade questionável, em termos dessas propriedades mencionadas, podem gerar instabilidade no arco, falhas de alimentação e descontinuidade no cordão de solda. Os arames utilizados na soldagem MIG/MAG e arco submerso são revestidos de cobre. Esta camada é aplicada para proteger contra a corrosão e também contribui para um contato elétrico mais eficaz entre o arame e o bico de contato.

No Brasil a classificação dos arames-eletrodos segue a norma da American Welding Society (AWS) A5.28/A5.28M:2005. A figura 9 apresenta a nomenclatura determinada por esta norma.

Figura 9 – Sistema de classificação para arame-eletrodo



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em AWS (2005).

Na figura 10 é possível verificar a composição química de diferentes arames-eletrodos.

A seleção do eletrodo a ser utilizado depende da composição e espessura do metal de base; do gás de proteção escolhido para o processo; da geometria da junta e do tipo de serviço da especificação aplicável (FORTES, 2005). Além disso é preciso considerar um estudo mais profundo caso sejam necessários diferentes elementos de liga.

Figura 10 – Requisitos de composição química para arame ou metal de solda

Classificação	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER 70S-2	0,07	0,9-1,4	0,40-0,70	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
ER 70S-3	0,06-0,15	0,9-1,4	0,45-0,75							
ER 70S-4	0,06-0,15	1,0-1,5	0,65-0,85							
ER 70S-6	0,06-0,15	1,4-1,8	0,80-1,15							
E 70S-7	0,06-0,15	1,5-2,0	0,50-0,80							
E 70S-G	Não especificado									
ER80S-B2	0,07-0,12	0,4-0,7	0,40-0,70	0,025	0,025	0,20	1,2-1,5	0,40-0,65	—	0,35
ER80S-B6	0,10	0,4-0,7	0,50			0,60	4,5-6,0	0,45-0,65	—	0,35
ER90S-B9	0,07-0,13	1,25	0,15-0,30	0,010	0,010	1,0	8,0-9,5	0,80-1,10	0,15-0,25	0,20
ER100S-1	0,08	1,2-1,8	0,20-0,55			1,4-2,1	0,30	0,25-0,55	0,5	0,25
ER110S-1	0,09	1,4-1,8	0,20-0,55			1,9-2,6	0,50	0,25-0,55	0,4	
ER120S-1	0,10	1,4-1,8	0,25-0,60			2,0-2,8	0,60	0,30-0,65	0,3	
ER 70C-3X*	0,12	1,75	0,90	0,03	0,03	0,50	0,20	0,30	0,08	0,50
E80C-B2	0,05-0,12	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	1,0-1,5	0,40-0,65	—	0,35
E80C-B3L	0,05	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	2,0-2,5	0,90-1,20	—	0,35
E90C-B3	0,05-0,12	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	2,0-2,5	0,90-1,20	0,15-0,25	0,35

Fonte: Marques; Modenesi e Bracarense (2009)

2.5.5 Influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão

Para garantir a eficiência dos processos de soldagem, é essencial um controle sobre os parâmetros utilizados, pois afetam o rendimento, qualidade e custo da junta soldada. A boa qualidade da junta soldada depende de uma boa penetração, taxa de aquecimento apropriada e correto perfil de solda. Estas características são afetadas pela corrente elétrica, tensão do arco elétrico, velocidade de soldagem e parâmetros do gás de proteção.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o processo de soldagem a arco pode ter suas variáveis divididas em quatro grupos:

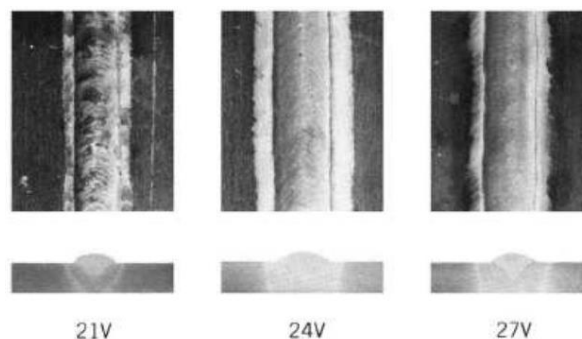
- Variáveis pré-determinadas: espessura e tipo do metal base; propriedades requisitadas para o metal de solda;

- Variáveis de fundo: procedimento de soldagem; tipo de equipamento; projeto da junta soldada; tipo e diâmetro de eletrodo, fluxo, gás de proteção; técnica de soldagem;
- Variáveis secundárias: ângulo do bocal em relação a peça, comprimento do eletrodo;
- Variáveis primárias: tensão do arco; corrente (tipo e intensidade); velocidade de soldagem.

Alguns parâmetros de soldagem podem ser alterados durante o processo, como velocidade de soldagem, intensidade de corrente, tensão do arco, comprimento do arame livre, ângulo e distância do bocal, posição e direção de soldagem e a taxa de fluxo de gás. Porém outros parâmetros devem ser pré-definidos pois não podem ser ajustados durante a realização do processo, como por exemplo diâmetro e composição do arame, tipo do gás de proteção e junta adotada.

Alguns parâmetros como tensão e comprimento do arco elétrico, são determinantes nas características do cordão, e um está relacionado ao outro, visto que a tensão do arco é influenciada pelo comprimento do arco, tipo e diâmetro do eletrodo, e do gás de proteção, influenciando assim no modo de transferência (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Em um processo em que os parâmetros são mantidos constantes, um aumento de tensão do arco causa uma diminuição da altura (ou reforço) do cordão de solda, redução da penetração e aumento de largura, conforme mostrado na figura 11.

Figura 11 – Efeito tensão utilizada na penetração do cordão de solda



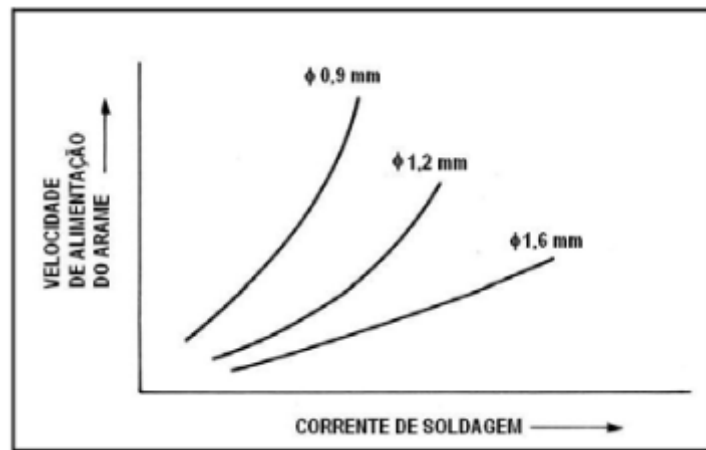
Fonte: Fortes (2005)

A corrente de soldagem é determinada enquanto a solda é realizada. Caso todas as variáveis forem mantidas constantes, a corrente de soldagem maior irá

causar um aumento na taxa de deposição e um consequente aumento na profundidade e largura do cordão de solda.

A velocidade determinada para alimentação do metal de adição influencia diretamente na corrente de soldagem. Quando a velocidade de alimentação é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido. A figura 12 mostra a relação entre a velocidade de alimentação do arame e a corrente de soldagem para diferentes diâmetros do arame ER70S-3. No gráfico é possível observar também que com o aumento do diâmetro do arame, ocorre um aumento na corrente de soldagem.

Figura 12 – Relação entre velocidade de alimentação e corrente de soldagem



Fonte: Fortes (2005)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), uma maior penetração da solda é alcançada em velocidades menores de avanço da tocha, diminuindo com o aumento de velocidade, influenciando também na largura do cordão e altura do reforço. A redução da penetração e largura do cordão estão relacionados à uma menor quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta soldada. A redução de quantidade de material de adição que é fornecido à solda devido a uma maior velocidade diminui o reforço do cordão. É considerável também que uma velocidade de soldagem muito alta pode causar uma descontinuidade do cordão pela falta de fusão do material.

2.6 Metalurgia da Soldagem

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o conhecimento dos fenômenos metalúrgicos é essencial em diversas aplicações da soldagem. Durante o processo, a região da junta é afetada pela aplicação localizada de calor, gerando alterações não desejáveis nas propriedades dos materiais. Estas alterações dependem das reações que ocorrem durante a solidificação, resfriamento do cordão de solda e da microestrutura proveniente do processo. O aporte de calor pode comprometer o desempenho em serviço do material devido as alterações nas propriedades, desta forma, o processo deve ser adequado para minimizar estes efeitos.

Para Wainer, Brandi e Mello (1992), os ciclos térmicos presentes nas zonas de solda devem ser estudados juntamente com o tempo de permanência das temperaturas e da velocidade de resfriamento da zona de solda, viabilizando o entendimento dos fenômenos térmicos durante a soldagem.

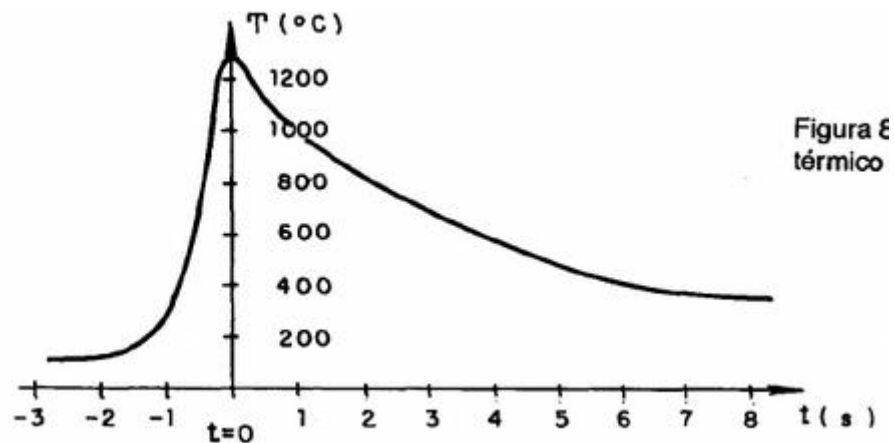
Conforme descrito por Perini (2008), a metalurgia da soldagem é baseada nos mesmos fundamentos da metalurgia convencional, porém difere em alguns pontos específicos. Os elementos de liga influenciam nas propriedades das juntas soldadas de maneira semelhante aos efeitos nas propriedades mecânicas dos aços.

O fluxo de calor presente na peça devido a soldagem a arco elétrico pode ser dividido em duas etapas básicas: fornecimento de calor à junta e dissipação do calor pela peça. No ponto onde ocorre a fusão o arco fornece uma grande quantidade de energia por unidade de comprimento da junta. Esta grande concentração de energia gera altos gradientes térmicos, alterando a microestrutura e as propriedades em um pequeno volume de material. Na segunda etapa, ocorre a dissipação de calor das regiões aquecidas para o restante do material pela condução na peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A figura 13 representa esquematicamente a curva de ciclo térmico de soldagem, que pode ser fracionado em três fases: a etapa onde ocorre um aquecimento acentuado do material no início do processo; a fase em que a temperatura máxima é atingida; e a etapa de resfriamento gradual até a temperatura

inicial. Na figura, o instante indicado com $t = 0$ representa o momento em que a fonte de calor atinge o ponto em estudo no sólido, os tempos negativos representam a aproximação da fonte de calor do ponto estudado, e os valores positivos, seu afastamento (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 13 – Ciclo térmico da soldagem

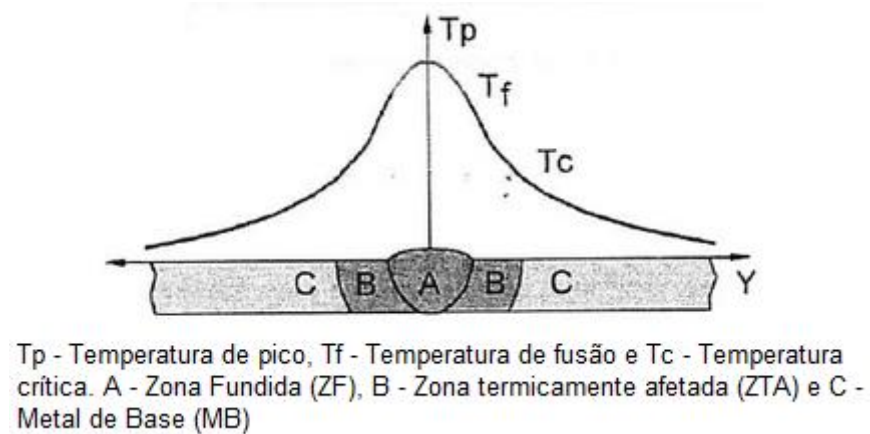


Fonte: Wainer Brandi e Mello (1992)

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) adicionam que uma solda por fusão pode ser definida por três regiões básicas, a partir da curva de repartição térmica (figura 14):

- Zona Fundida (ZF): região onde ocorre a fusão e solidificação do metal de adição durante a operação de soldagem. Nas partes mais quentes o metal de adição é misturado ao metal base fundido sob intensa agitação. As temperaturas de pico nesta região são superiores à temperatura de fusão (T_f) do metal base.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): também conhecida por Zona Afetada pelo Calor (ZAC), é a região onde não ocorre a fusão do metal base, porém há alteração na microestrutura e/ou propriedades pelo ciclo térmico de soldagem. As características desta região podem variar em função do tipo de metal base e do ciclo térmico de soldagem.
- Metal de Base (MB): área mais distante do cordão de solda não afetada pelo processo de soldagem. Nesta região as temperaturas de pico são inferiores à temperatura crítica do material.

Figura 14 – Regiões de uma solda por fusão (esquemática)



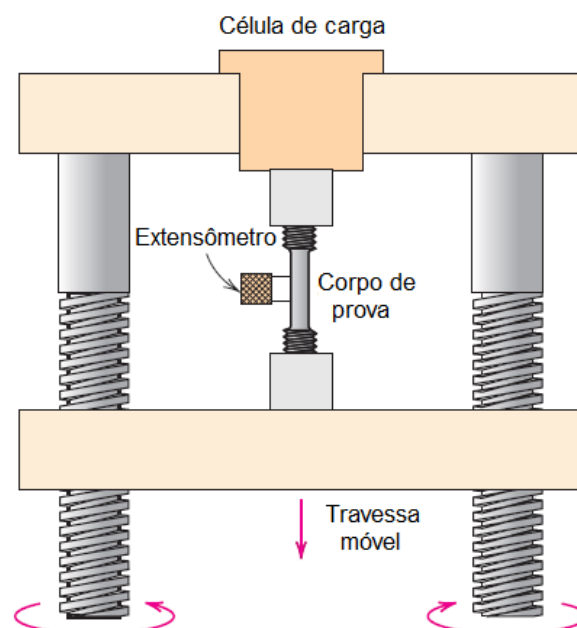
Fonte: Adaptado pelo autor, com base em Marques; Modenesi e Bracarense (2009).

2.7 Ensaio de tração

O ensaio de tração segue a norma ASME IX (*American Society of Mechanical Engineers*).

Conforme Callister (2011), o ensaio de tração é utilizado para determinar várias propriedades mecânicas de materiais que são fundamentais para análises em projeto. No ensaio, é aplicada uma carga de tração de forma uniaxial ao longo do eixo de um corpo de prova deformado até sua fratura. A figura 15 demonstra o processo.

Figura 15 – Representação esquemática do aparelho utilizado para ensaio de tração

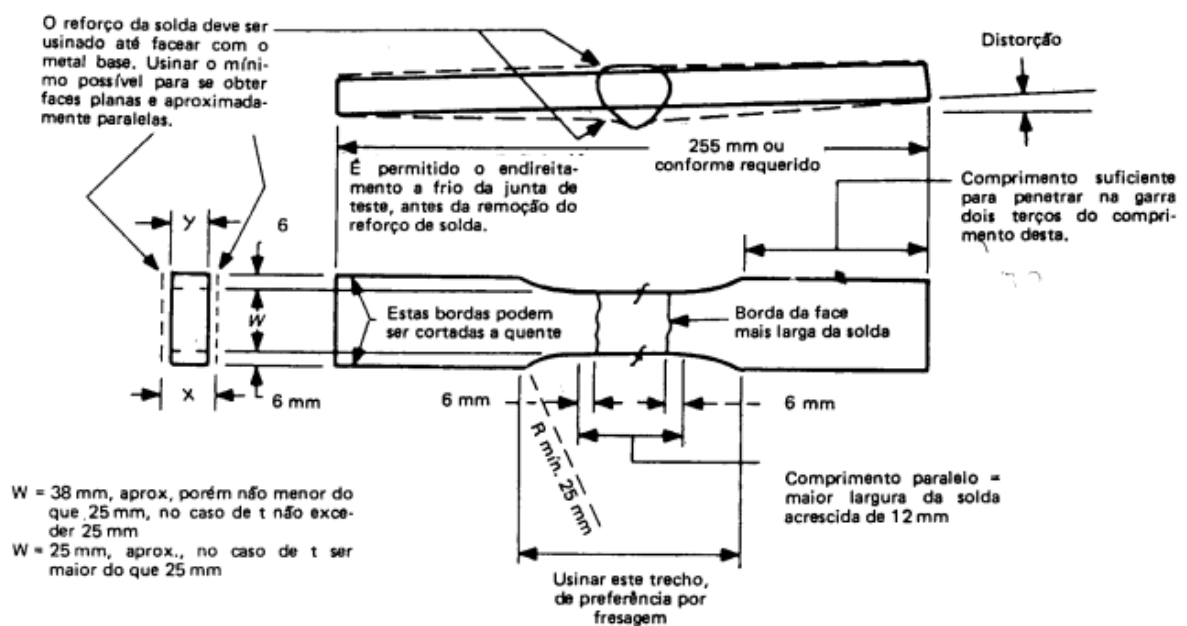


Fonte: Adaptado pelo autor, com base em Callister (2011).

Segundo Garcia et al. (2012) as principais características mecânicas determinadas pelo ensaio de tração são: módulo de elasticidade, limite de resistência à tração e de escoamento, coeficiente de encruamento e ductilidade.

Conforme a norma ASME IX, os corpos de prova utilizados no processo podem ter secção circular ou retangular. O corpo de prova de seção retangular é ilustrado na figura 16.

Figura 16 – Corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: ASME IX (2016).

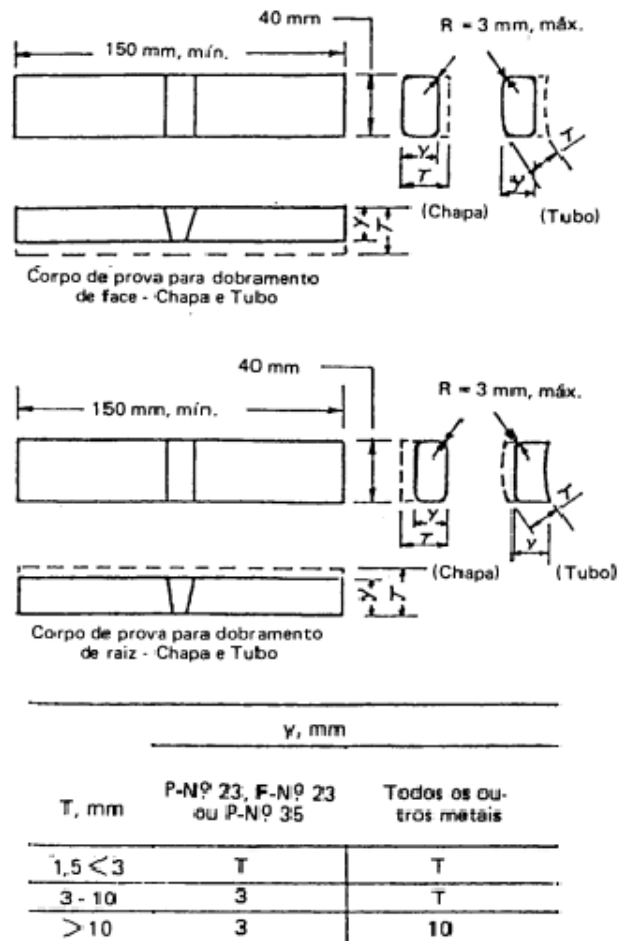
2.8 Ensaio de dobramento guiado

O ensaio de dobramento guiado resume-se em dobrar um corpo de prova assentado em dois apoios afastados a uma distância específica de acordo com o tamanho do corpo de prova. O dobramento é realizado por um cutelo que aplica esforço de flexão localizado na parte central do corpo de prova até que seja atingido um ângulo especificado (SOUZA, 1982).

O ensaio é utilizado para análise qualitativa da conformação do material. Em juntas soldadas deve ser observado o surgimento de fissuras, fendas ou ruptura na

zona tracionada, revelando possíveis problemas metalúrgicos do processo de soldagem. A figura 17 ilustra os corpos de prova utilizados no ensaio.

Figura 17 – Corpo de prova para ensaio de dobramento



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em ASME IX (2016).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No presente capítulo apresentam-se os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, tratando sobre os principais assuntos presentes no estudo, dando ênfase ao processo de análise experimental do processo de soldagem MAG aplicado ao aço de alta resistência e baixa liga.

3.1 Objeto de estudo

A metodologia de pesquisa enquanto ao objetivo geral utilizada no trabalho é exploratória e investigativa. Conforme Gil (2002), a pesquisa exploratória consiste em levantamentos bibliográficos contribuindo para um maior entendimento do assunto que será abordado. Para Marconi e Lakatos (2003), com a pesquisa exploratória o autor tem o objetivo de desenvolver hipóteses e se familiarizar com um ambiente, fato ou fenômeno possibilitando uma futura realização de pesquisa utilizando procedimentos sistemáticos. Além disso Perovano (2016), afirma que a modalidade investigativa parte de pressupostos teóricos e conceituais utilizados para elaboração de estudos experimentais.

Este trabalho é baseado em levantamentos bibliográficos e obtenção de dados instrumentais para análise da problemática a partir da comparação dos dados obtidos. Desta forma, trata-se de uma pesquisa quantitativa exploratória e investigativa.

3.2 Tipo de pesquisa

Segundo Perovano (2016), a pesquisa quantitativa parte de um problema pré-selecionado e com a investigação são determinados os objetivos e a hipótese. Devem ser realizadas coletas de dados e análise do comportamento do objeto de estudo. Além disso a pesquisa quantitativa deve ser realizada com o estudo preliminar de um tema bem delimitado e concreto. Leopardi (2002) adiciona que esse tipo de pesquisa deve ser utilizado em algo que pode ser mensurado, partindo de um estudo exploratório para conhecimento mais aprofundado do problema em questão.

Para Gil (2002), a pesquisa tem como objetivo propor respostas aos problemas propostos. A pesquisa de ordem prática concentra-se em tornar algo mais eficiente, enquanto a pesquisa intelectual trata de obter o conhecimento pela própria satisfação.

Portanto, a partir do exposto, a presente pesquisa pode ser classificada como quantitativa, de ordem prática e experimental, onde o principal objetivo é mensurar a diferença entre o material base e o mesmo material quando submetido ao processo de soldagem MAG a partir do levantamento de dados.

3.3 ASME IX – Norma de qualificação para soldagem

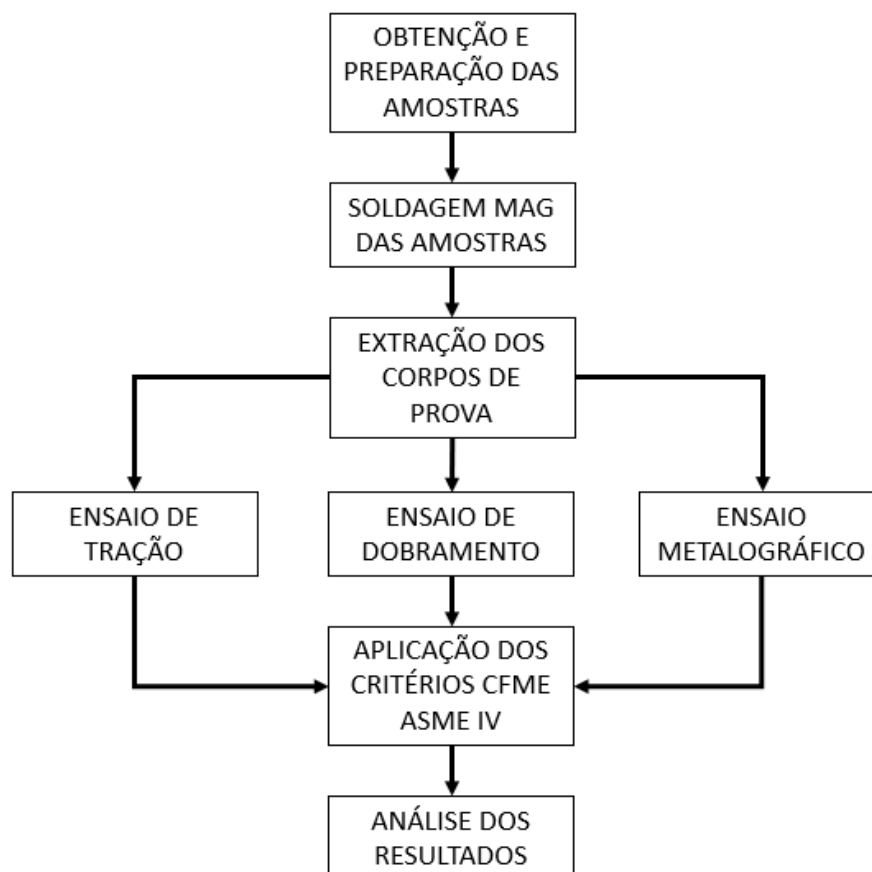
Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2009) a utilização de regras e regulamentos nos processos de fabricação é importante para evitar acidentes e outros problemas que podem afetar os fabricantes, usuários, a população em geral e o meio ambiente.

Nas operações de soldagem a execução de processos inadequados pode resultar em sérios acidentes e grandes perdas materiais, como em estruturas metálicas de pontes, navios, vasos de pressão e componentes automotivos. Desta forma, existem diferentes códigos, especificações e normas para cada aplicação específica com o objetivo de reduzir a variabilidade nos produtos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Um código, por definição, consiste em um conjunto abrangente de regras e normas para uma aplicação específica. Em diversas situações o código tem caráter obrigatório definido por lei (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O código ASME IX é empregado internacionalmente em processos de soldagem e indústrias de fabricação definindo requisitos e especificando processos de qualificação além do enquadramento de soldadores. O código é dividido em duas partes, tratando dos processos de brasagem e soldagem. Para o presente estudo utilizam-se os procedimentos definidos pelo item QW-Soldagem onde são ilustrados os métodos para execução de processos a fim de validar as propriedades mecânicas de corpos de prova soldados. A figura 18 ilustra o fluxo experimental.

Figura 18 – Fluxo experimental



Fonte: Do autor.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo apresentam-se os métodos adotados durante a elaboração do trabalho, buscando validar, quantificar e qualificar as propriedades mecânicas da junta soldada pelo processo MAG no aço LNE 38.

Para a qualificação dos corpos de prova utilizou-se os critérios presentes no código ASME IX e ASME V.

4.1. Metal base para soldagem

O metal base utilizado trata-se de uma chapa de aço de alta resistência e baixa liga, acalmado, tipo perlita reduzida denominado como LNE 38.

As propriedades mecânicas e a composição química do material seguem a norma ABNT NBR 6656:2008 já descritas no capítulo 3 deste trabalho.

4.2. Obtenção dos corpos de prova

A norma ASME não indica uma quantidade de corpos de prova necessários para avaliação do processo, desta forma, com base em outros estudos, foram confeccionadas dez peças de 150x300 mm por meio do corte a frio, pela guilhotina hidráulica SORG SGH 68/40, conforme a figura 19.

Figura 19 – Guilhotina Hidráulica SORG SGH 68/40



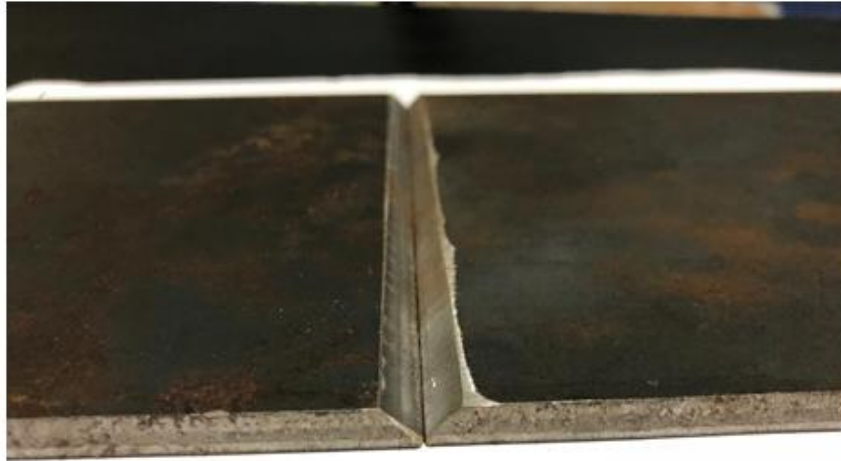
Fonte: Do autor

4.3. Preparação para soldagem dos corpos de prova

Após o corte cinco peças foram separadas para usinagem de um chanfro de 45° na região da junta utilizando uma máquina fresadora, para análise da influência nas propriedades mecânicas com a presença do chanfro de face. A figura 20 ilustra os corpos de prova após o fresamento.

Antes da soldagem, todos os corpos de prova foram higienizados com um desengordurante na região da junta buscando remover a presença de possíveis impurezas.

Figura 20 - Corpo de prova com chanfro de face



Fonte: Do autor.

Após a usinagem e higienização, os corpos de prova foram identificados conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 – Referência dos corpos de prova para soldagem

Identificação do corpo de prova	Acabamento da face soldada	Processo de soldagem
CP-01	SEM CHANFRO	MAG
CP-02	SEM CHANFRO	MAG
CP-03	SEM CHANFRO	MAG
CP-04	SEM CHANFRO	MAG
CP-05	SEM CHANFRO	MAG
CP-06	COM CHANFRO	MAG
CP-07	COM CHANFRO	MAG
CP-08	COM CHANFRO	MAG
CP-09	COM CHANFRO	MAG
CP-10	COM CHANFRO	MAG

Fonte: Do autor.

4.4. Procedimento de soldagem

Para validar o processo de alongamento de chassi utilizou-se o mesmo metal de adição, assim como parâmetros adotados pela empresa onde confeccionaram-se os corpos de prova. O gás de proteção do arco elétrico trata-se de uma mistura de 82% Argônio e 12% de CO_2 com vazão de 20 L/min. A corrente utilizada no processo foi contínua de 150A, com polaridade positiva e tensão de 24V.

A máquina utilizada para soldagem fora a SUMIG FALCON 500 e conforme ilustrado na figura 21, para manter a velocidade constante, foi utilizado um equipamento de soldagem mecanizado acoplado à tocha. A velocidade regulada foi de 40cm/min e o sentido de soldagem negativo, “empurrando a tocha”.

Figura 21 – Soldagem mecanizada dos corpos de prova



Fonte: Do autor.

4.5. Norma para avaliação dos corpos de prova

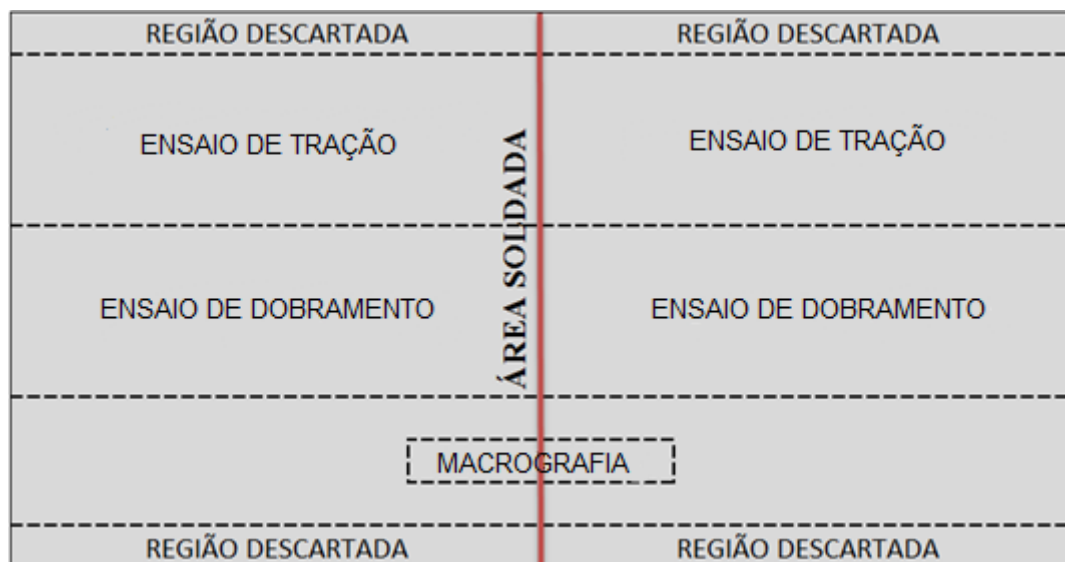
Para execução dos ensaios utilizou-se os critérios de avaliação e métodos de aplicação presentes no código ASME IX e ASME V. Os itens utilizados do código estão listados abaixo:

- QW-195: Exame por Líquido Penetrante;
- QW-150: Ensaio de tração;

Para o ensaio de dobramento foram utilizados os critérios presentes no código ASME V.

Após a realização da soldagem as amostras foram submetidas ao exame por líquido penetrante e posteriormente foram extraídos os corpos de prova para os ensaios de macrografia, tração e dobramento conforme ilustra a figura 22.

Figura 22 – Distribuição de corpos de prova para realização de ensaios destrutivos



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em ASME IX (2010).

A preparação dos corpos de prova seguiu os procedimentos detalhados nos tópicos a seguir.

Os corpos de prova receberam uma nova referência conforme o ensaio a ser realizado, cada corpo de prova soldado deu origem a três novos corpos de prova

sendo um corpo de prova para o ensaio de tração, um corpo de prova para o ensaio de dobramento e um corpo de prova para macrografia. A tabela 7 apresenta as novas referências.

Tabela 7 – Referências dos corpos de prova para ensaios destrutivos

Identificação do corpo de prova	Referência do corpo de prova para ensaio destrutivo	Ensaio realizado
CP-01	CP-01A	TRAÇÃO
	CP-01B	DOBRAMENTO
	CP-01C	MACROGRÁFICO
CP-02	CP-02A	TRAÇÃO
	CP-02B	DOBRAMENTO
	CP-02C	MACROGRÁFICO
CP-03	CP-03A	TRAÇÃO
	CP-03B	DOBRAMENTO
	CP-03C	MACROGRÁFICO
CP-04	CP-04A	TRAÇÃO
	CP-04B	DOBRAMENTO
	CP-04C	MACROGRÁFICO
CP-05	CP-05A	TRAÇÃO
	CP-05B	DOBRAMENTO
	CP-05C	MACROGRÁFICO
CP-06	CP-06A	TRAÇÃO
	CP-06B	DOBRAMENTO
	CP-06C	MACROGRÁFICO
CP-07	CP-07A	TRAÇÃO
	CP-07B	DOBRAMENTO
	CP-07C	MACROGRÁFICO
CP-08	CP-08A	TRAÇÃO
	CP-08B	DOBRAMENTO
	CP-08C	MACROGRÁFICO
CP-09	CP-09A	TRAÇÃO
	CP-09B	DOBRAMENTO
	CP-09C	MACROGRÁFICO
CP-10	CP-10A	TRAÇÃO
	CP-10B	DOBRAMENTO
	CP-10C	MACROGRÁFICO

Fonte: Do autor.

4.5.1 Ensaio visual por líquido penetrante

Em ambas as faces dos dez corpos de prova realizou-se o ensaio por líquido penetrante logo após o processo de soldagem. Antes da aplicação do líquido penetrante, todas as superfícies foram escovadas e limpas para evitar a presença de impurezas que pudessem interferir no resultado do ensaio.

Após a limpeza os corpos de prova foram dispostos sobre uma mesa onde foi aplicado o líquido penetrante PCG 53 – CARBOGRAFITE na superfície “A” de cada peça. Conforme orientação, aguardou-se aproximadamente 10 minutos para deixar o fluido agir. Na sequência, removeu-se o excesso de líquido presente na superfície do material utilizando o removedor RCG S – CARBOGRAFITE e então executada a revelação por meio do líquido DCG S2 – CARBOGRAFITE.

Após a análise o mesmo procedimento foi aplicado para realizar o ensaio na superfície “B” dos corpos de prova.

Como parâmetros para validação do ensaio foram utilizados os critérios citados abaixo presentes no item QW195.2.2 do ASME IV:

Para aprovação do corpo de prova as superfícies devem estar livres de:

- (a) Indicações lineares relevantes onde o comprimento é maior que três vezes a largura, com dimensões maiores do que 1/16” (1,6mm);
- (b) Indicações arredondadas com dimensões maiores do que 3/16” (4,76 mm);
- (c) Quatro ou mais indicações arredondadas em linha separadas por 1/16” (1,6mm) ou menos.

4.5.2 Ensaio de tração

Executou-se o ensaio de tração em dez corpos de prova com o objetivo de determinar o limite de resistência à tração, alongamento e tensão de escoamento dos materiais soldados.

Os corpos de prova seguiram as dimensões presentes no item QW.462.1(a) do ASME IX (conforme figura 16 do trabalho). As peças foram cortadas a frio na guilhotina citada na figura 19 e tiveram sua secção central usinada por fresamento.

O equipamento utilizado foi da marca Pantec com uma célula de carga com capacidade de 100kN disposta no laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES.

Figura 23 – Máquina de ensaio a tração Pantec, modelo VERSAT



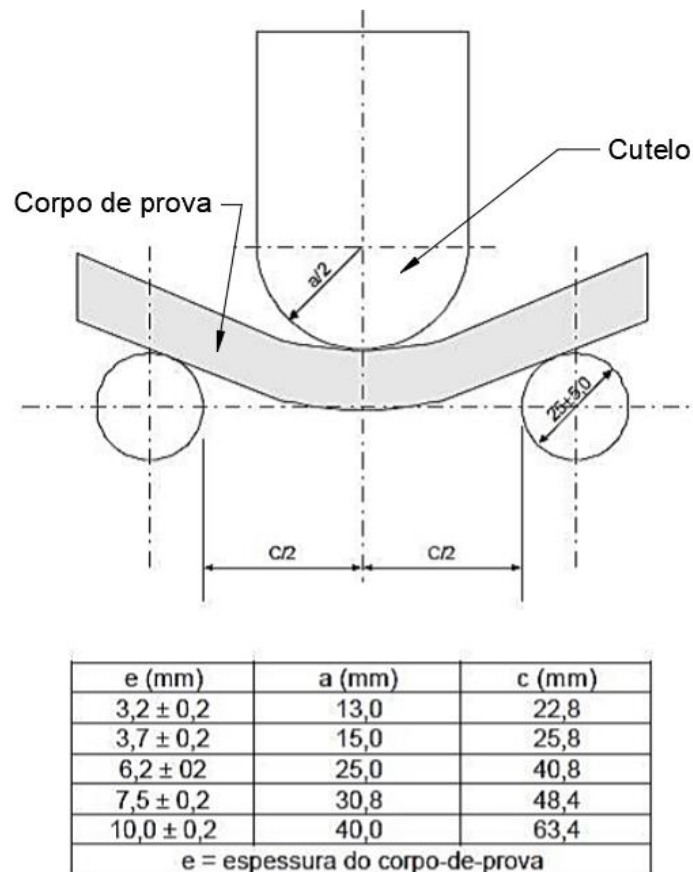
Fonte: Do autor.

4.5.3 Ensaio de dobramento

A fim de obter-se dados qualitativos referentes a ductilidade da junta soldada, realizou-se o ensaio de dobramento. Este ensaio trata-se de uma deformação plástica

por flexão e é aplicado para verificar possíveis problemas metalúrgicos na soldagem, como falta de penetração, trincas e mordeduras. A representação do dispositivo utilizado é ilustrada na figura 24.

Figura 24 – Representação do dispositivo para ensaio de dobramento



Fonte: Adaptado pelo autor, com base em ASME V (1995).

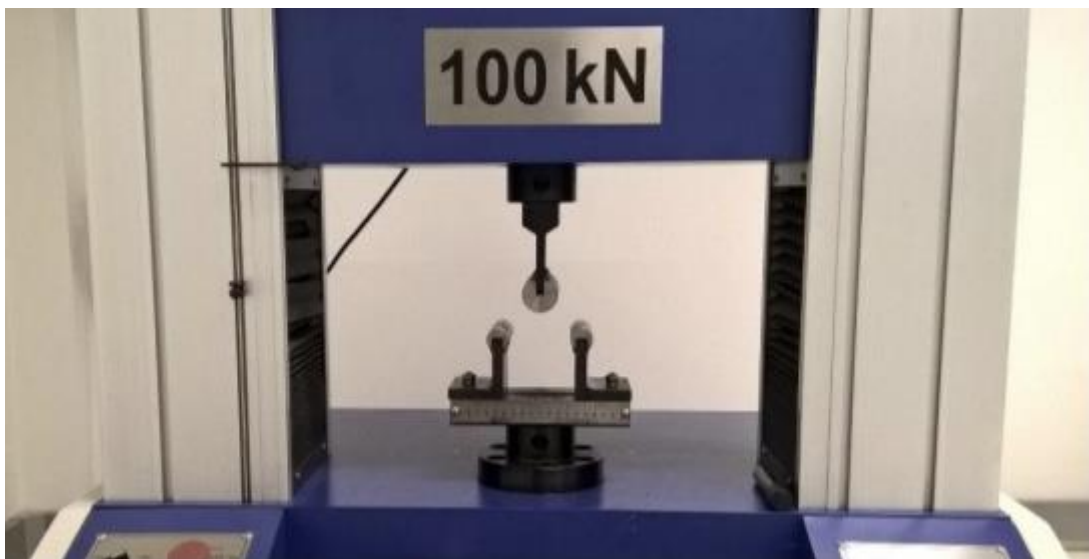
Conforme a norma ASME V o ensaio de dobramento deve ser aplicado seguindo os critérios abaixo:

- O corpo de prova deve situar-se no centro dos apoios submetido a carga do cutelo. A força aplicada no corpo de prova deve ser removida somente quando a distância entre as extremidades do corpo de prova e as superfícies laterais do cutelo seja menor que 1mm.
- Como critério de aprovação não devem existir falhas ou trincas maiores do que três milímetros na superfície do corpo de prova. Não devem ser consideradas trincas próximas as bordas, desde que não sejam causadas por inclusão de

escória ou defeitos internos do material e que não sejam maiores que seis milímetros.

O ensaio foi realizado acoplando o dispositivo de dobramento no mesmo equipamento onde realizou-se o ensaio de tração. O dispositivo utilizado está disposto no laboratório da Univates e foi dimensionado seguindo os critérios da norma ASME V. A figura 25 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.

Figura 25 – Equipamento para ensaio de dobramento



Fonte: Do autor.

4.5.4 Ensaio macrográfico

As amostras para ensaio macrográfico foram extraídas utilizando a Cortadora Metalográfica CM-80 ilustrada na figura 26. Por meio da macrografia buscou-se verificar a macroestrutura da junta soldada, a partir de uma inspeção visual, com o objetivo de verificar se houve penetração total da junta bem como inspecionar a extensão da zona termicamente afetada.

Figura 26 – Cortadora Metalográfica CM80



Fonte: Do autor.

Após o corte as amostras foram lixadas seguindo a ordem granulométrica de 220, 400, 600 e 1200 *mesh* buscando uma superfície homogênea em toda a superfície da peça. Realizou-se também polimento em uma Politriz de bancada utilizando água e sílica. Para possibilitar a identificação do metal base e junta soldada as amostras foram submetidas a um ataque químico com Nital 5% durante 10 segundos.

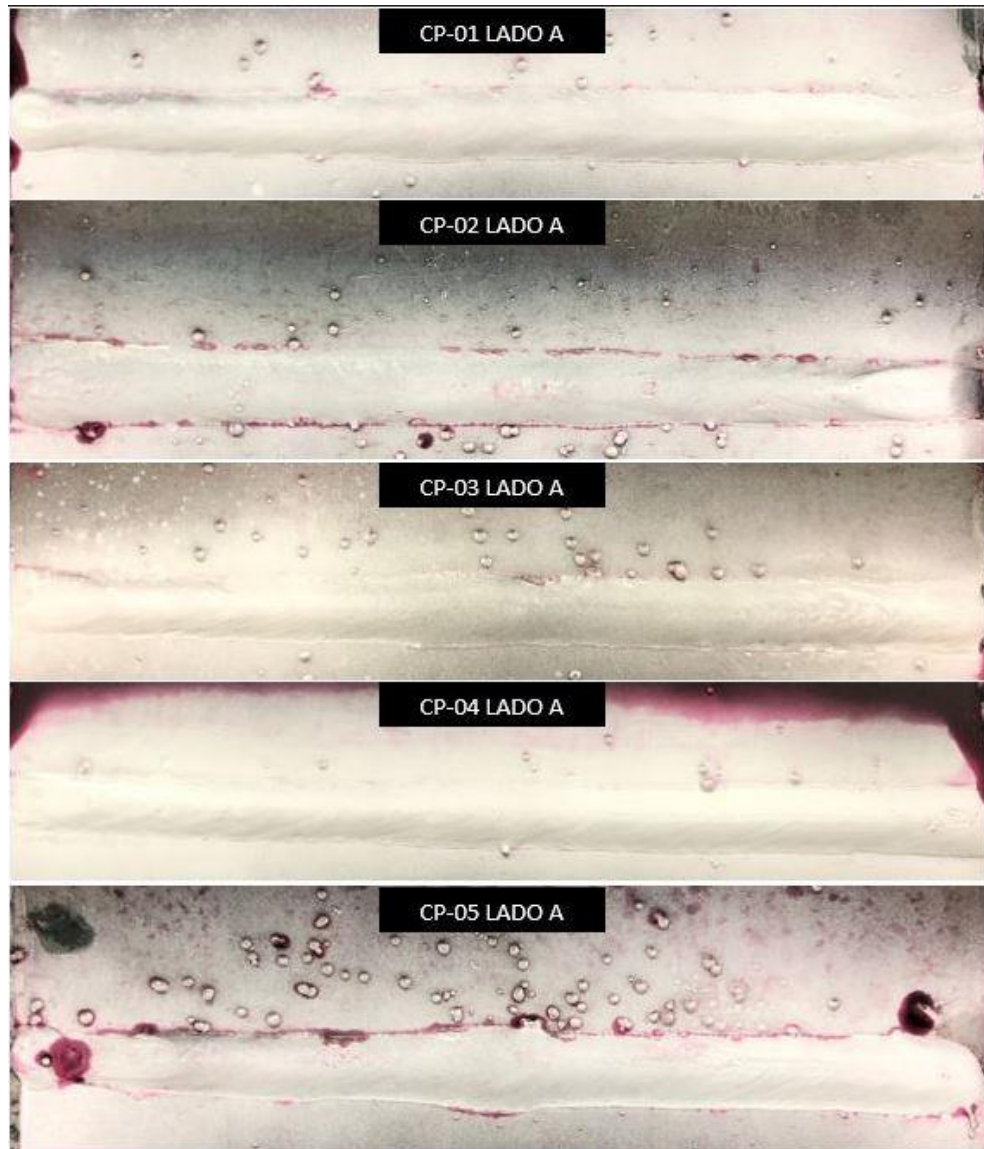
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio por líquido penetrante

Antes da aplicação do ensaio os cordões de solda foram examinados visualmente a fim de verificar a presença de fissuras ou trincas, onde nenhum apresentou anomalia.

Em seguida realizou-se o ensaio em todas as amostras com o propósito de gerar resultados qualitativos quanto a presença de trincas, porosidade e demais anomalias. A figura 27 apresenta os cordões de solda no lado A dos corpos de prova CP-01, CP-02, CP-03, CP-04 e CP-05 soldados pelo processo MAG sem o chanfro de face.

Figura 27 – Ensaio de LP em CP-01 a CP-05, lado A



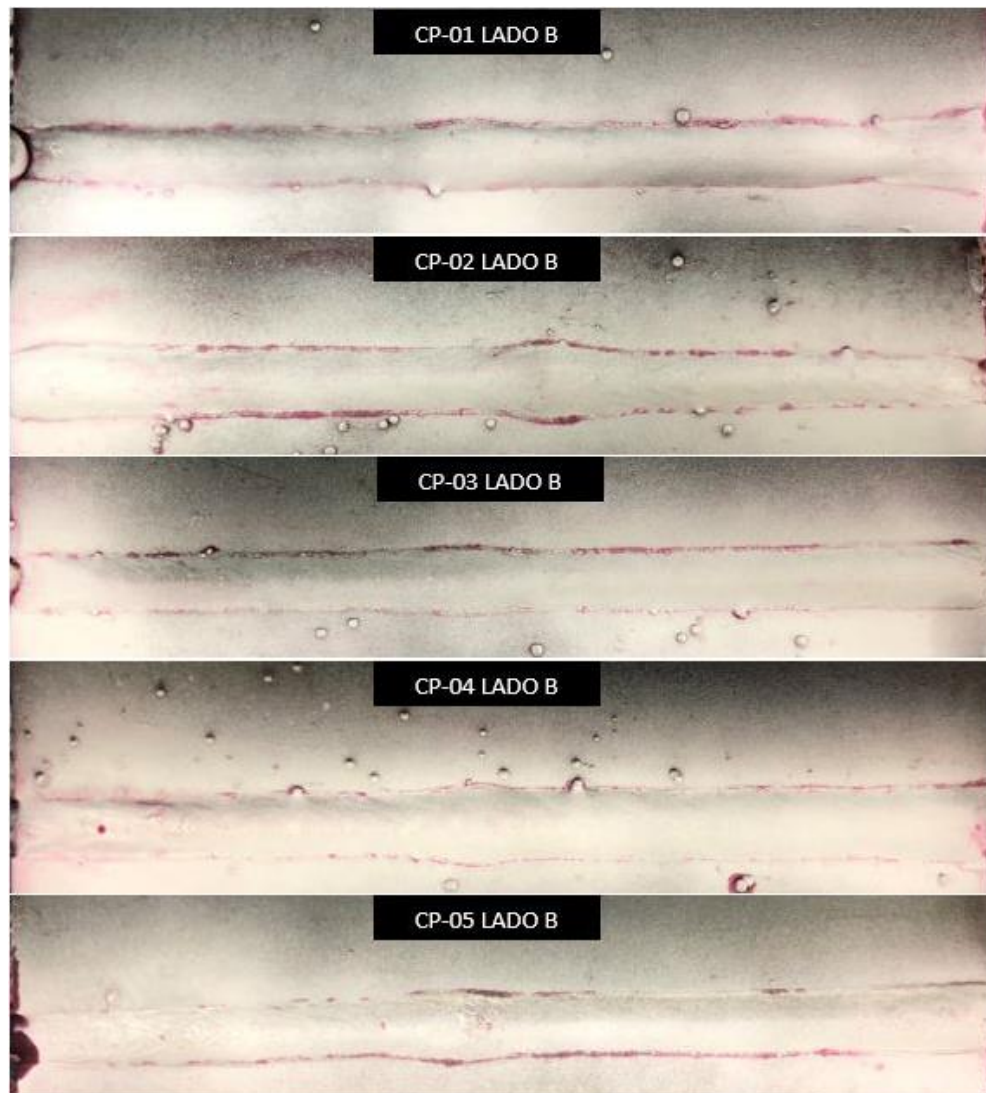
Fonte: Do autor.

Com base nos critérios de avaliação do ASME IX os corpos de prova CP-02 e CP-05 foram reprovadas por apresentarem falhas lineares relevantes, onde o comprimento é maior que três vezes a largura, anomalias provenientes do excesso de porosidade entre o cordão de solda e o metal base.

Os cordões de solda no lado A dos corpos de prova CP-01, CP-03 e CP-04 foram aprovados por não apresentarem anomalias considerando-se os critérios presentes no código.

A seguir o lado B dos corpos de prova CP-01, CP-02, CP-03, CP-04 e CP-05:

Figura 28 - Ensaio de LP em CP-01 a CP-05, lado B



Fonte: Do autor.

Utilizando-se os mesmos critérios de avaliação todos os cordões de solda do lado B foram reprovados devido a presença de falhas lineares relevantes, resultantes da porosidade presente entre o metal base e o cordão de solda.

Em seguida, os corpos de prova com chanfro de face: CP-06, CP-07, CP-08, CP-09 e CP-10, lado A, conforme figura 29.

Figura 29 - Ensaio de LP em CP-06 a CP-10, lado A



Fonte: Do autor.

Aplicando-se os mesmos critérios já comentados, os cordões de solda dos corpos de prova CP-07, CP-08, e CP-09 referentes ao lado A foram reprovados devido a presença de falhas lineares relevantes, resultantes da porosidade presente entre o metal base e o cordão de solda. Os cordões de solda dos corpos de prova CP-06 e CP-10 referentes ao lado A foram aprovados.

Na sequência, os corpos de prova com chanfro de face: CP-06, CP-07, CP-08, CP-09 e CP-10, lado B, conforme figura 29.

Figura 30 - Ensaio de LP em CP-06 a CP-10, lado B



Fonte: Do autor

Aplicando-se os mesmos critérios das amostras anteriores, os cordões de solda dos corpos de prova CP-06, CP-08, CP-09 e CP-10 referentes ao lado B foram reprovados devido a presença de falhas lineares relevantes, resultantes da porosidade presente entre o metal base e o cordão de solda. O cordão de solda do corpo de prova CP-07 referente ao lado B foi aprovado.

Desta forma, constatou-se que o processo MAG apresentou um grande índice de anomalias lineares provenientes do excesso de porosidade concentrada nos cordões de solda. Além disso foi possível observar que o ensaio de líquido penetrante

identificou também as mordeduras presentes no lado A dos corpos de prova CP-07 e CP-08.

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), dentre os defeitos existentes na soldagem MIG/MAG os mais comuns são porosidade, falta de penetração, falta de fusão e mordeduras. Segundo os autores estes defeitos podem ser prevenidos com alguns ajustes no processo como: ajuste da vazão do gás de proteção, proteção quanto a correntes de ar, ajuste de corrente e velocidade de soldagem.

Machado (2007) afirma que a intensidade da tensão de soldagem é um parâmetro que deve ser bem definido pois influencia diretamente na geometria do cordão e pode influenciar na porosidade e mordeduras. Um valor de tensão muito baixo pode causar um aumento de porosidade no cordão.

Além disso, segundo AWS (1991) a porosidade no cordão de solda quando superior a 3% pode influenciar diretamente na resistência mecânica da junta.

5.2 Ensaio de tração

Executou-se o ensaio de tração com o objetivo de certificar a eficiência da junta soldada dos corpos de prova com e sem chanfro de face. O ensaio foi realizado em 10 corpos de prova de acordo com a tabela 7 apresentada no capítulo anterior.

O item QW-153 do ASME IX apresenta os critérios de aceitação para os corpos de prova que são avaliados no ensaio de tração. Este item avalia o ensaio pelo limite de resistência a tração da junta soldada. O código cita que o valor mínimo admissível para o limite de resistência a tração deve ser o mínimo especificado para o metal base, neste caso 460MPa. Caso a ruptura aconteça fora da região soldada admite-se até 5% abaixo deste valor, ou seja, 437MPa.

A tabela 8 apresenta os valores de Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência a Tração (LR) e Alongamento obtidos a partir do ensaio de tração dos corpos de prova:

Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração

REF	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento
CP-01A	418,55	457,65	19,55%
CP-02A	451,56	460,05	30,00%
CP-03A	396,77	454,42	29,86%
CP-04A	366,62	437,56	29,50%
CP-05A	398,63	459,4	30,12%
CP-06A	411,35	439,7	31,13%
CP-07A	381,59	421,34	20,69%
CP-08A	383,55	426,58	18,69%
CP-09A	405,71	448,2	32,02%
CP-10A	405,98	444,18	28,34%

Fonte: Do autor.

Dentre os corpos de prova ensaiados, os corpos de prova CP-01A, CP-07A e CP-08A apresentaram rompimento próximo da região soldada conforme ilustra a figura 31.

Figura 31 – Rompimento próximo a região soldada em ensaio de tração.



Fonte: Do autor.

Os demais corpos de prova apresentaram rompimento dentro da área útil destinada ao ensaio, porém em região distante do cordão de solda.

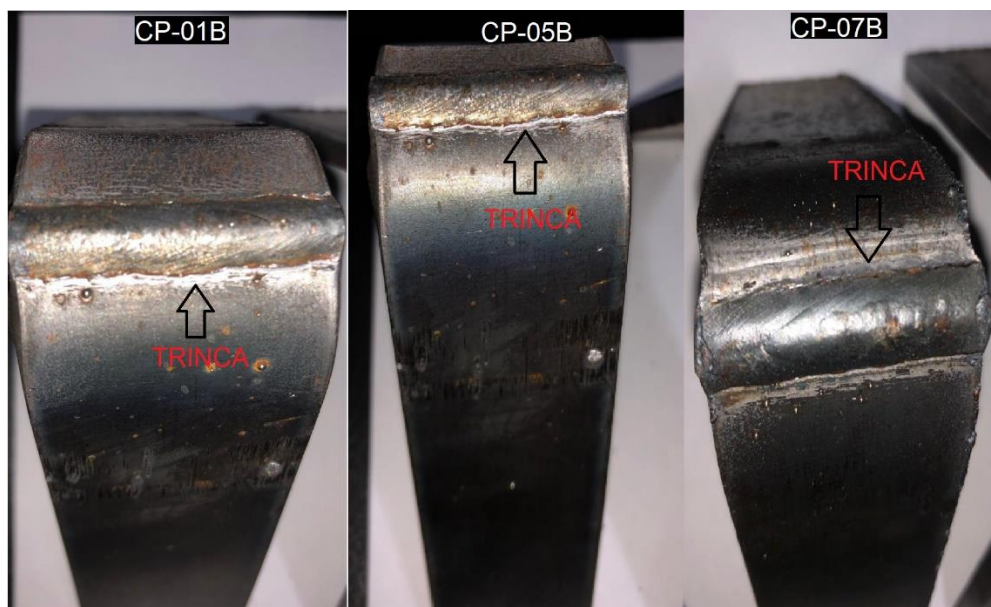
Desta forma, considera-se que os corpos de prova CP-01A, CP-07A e CP-08A que apresentaram o rompimento na região soldada foram reprovados por possuírem limite de resistência a tração inferior a 460MPa. Os demais corpos de prova foram aprovados.

5.3 Ensaio de dobramento

Para avaliar a ductilidade das juntas soldadas realizou-se o ensaio de dobramento de face. A partir do ensaio é possível realizar a inspeção visual dos corpos de prova em busca de possíveis trincas e falhas próximas ao cordão de solda.

Os corpos de prova CP-01B, CP-05B e CP-07B apresentaram trincas maiores do que 3mm junto ao cordão de solda e consideram-se desqualificadas, a figura 32 ilustra os corpos de prova:

Figura 32 – Corpos de prova com anomalias após ensaio de dobramento



Fonte: Do autor.

O corpo de prova CP-01B apresentou também o surgimento de uma trinca próximo ao centro da solda conforme figura 33.

Figura 33 – Surgimento de trinca próximo ao centro da solda

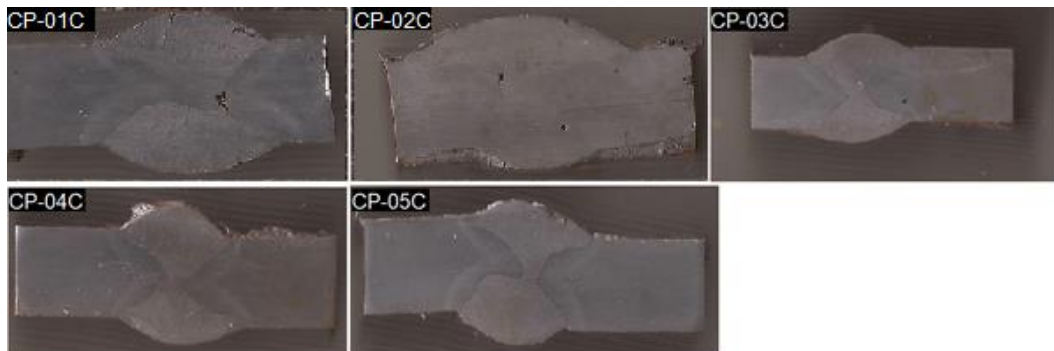


Fonte: Do autor.

5.4 Ensaio macrográfico

A partir da macrografia buscou-se verificar a penetração da solda e a zona termicamente afetada, também como possíveis defeitos na região soldada. A figura 34 apresenta a macrografia dos corpos de prova CP-01C, CP-02C, CP-03C, CP-04C e CP-05C.

Figura 34 – Macrografia dos corpos de prova CP-01C a CP-05C.

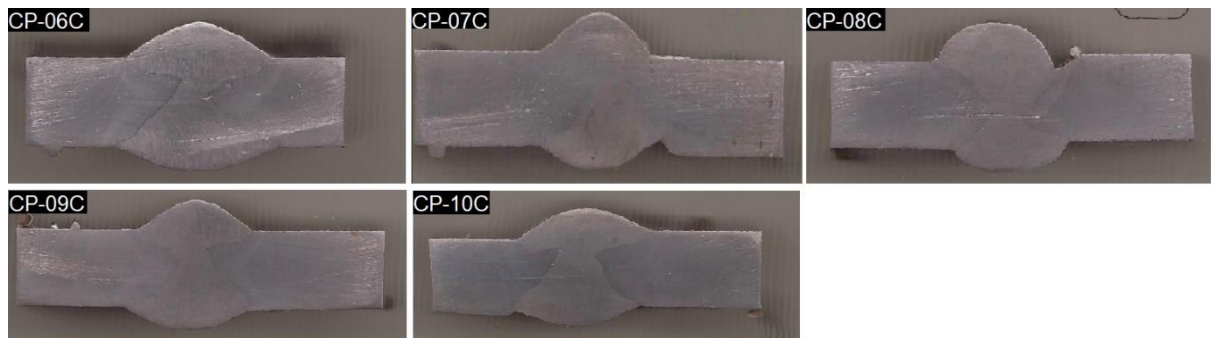


Fonte: Do autor.

Nos corpos de prova CP-01C, CP-02C e CP-03C é possível verificar a presença de porosidade próximo ao cordão de solda. O corpo de prova CP-01C apresentou uma penetração inferior em relação aos demais, não demonstrando uma fusão adequada no processo. Nos corpos de prova CP-01C, CP-03C, CP-04C e CP-05C a ZTA ficou bem nítida, enquanto o CP-02C não foi possível verificar a região.

Nos corpos de prova soldados com chanfro de face é possível verificar uma boa penetração em todos os cordões, porém no CP-07C e CP-08C como observado na figura 35, é possível verificar a presença de mordedura entre o cordão e o metal base.

Figura 35 - Macrografia dos corpos de prova CP-06C a CP-10C.



Fonte: Do autor.

CONCLUSÃO

Conforme apresenta-se neste trabalho referente a análise de comportamento das propriedades mecânicas de uma junta de aço LNE 38 soldado pelo processo MAG, tornou-se possível concluir que:

- Os resultados das análises e ensaios apresentam resultados satisfatórios e apoiam as conclusões deste trabalho.
- Para o processo estudado não houve influência do chanfro na resistência a tração e ductilidade do material.
- Observou-se a presença de mordeduras em dois corpos de prova influenciando diretamente no comportamento mecânico e ductilidade da junta soldada. Estes defeitos originaram-se provavelmente de um erro operacional no momento da soldagem.
- A partir do líquido penetrante e da macrografia evidenciou-se uma grande porosidade nos cordões de solda. Além disso, com a macrografia verificou-se uma boa penetração nas juntas soldadas.
- Os corpos de prova apresentaram uma boa ductilidade no ensaio de dobramento, reforçando a aplicação do aço LNE 38 em perfis dobrados.
- No ensaio de tração foi possível observar que grande parte dos corpos de prova apresentou um limite de resistência a tração inferior a 460MPa, valor mínimo indicado pela norma ABNT NBR 6656:2008 para o aço.
- Conforme constatado pelos ensaios mecânicos a grande maioria dos corpos de prova reprovou nos critérios dispostos pela ASME, desta forma, é possível afirmar que o processo não é adequado na aplicação visto que os defeitos podem influenciar negativamente no comportamento mecânico da junta.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar o mesmo processo, variando os parâmetros de soldagem para verificar a influência das mudanças no processo. Além disso, outra possibilidade seria a utilização de diferentes materiais de adição e a aplicação de ensaios buscando avaliar o comportamento da junta soldada quanto a vida em fadiga.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656**: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ALFREDO, W. **Lei da Balança** – Considerações Gerais, CENTRAN – Centro de excelência em Engenharia de Transportes, 2009.

ARMCO. **Aços de Alta Resistência e Baixa Liga**: Tabela de Equivalência. Disponível em: <http://www.armco.com.br/wp/wpcontent/uploads/2011/09/AcoAltaResistenciaBaixaLiga_tabeladeequivalencia.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM INTERNATIONAL HANDBOOK: Materials Park, Alloying: Understanding the Basics**, 2001.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME IX**: Boiler and Pressure Vessel Code. 2011

DE AVILA, Thales L. D.; BRACARENSE, Alexandre Q.; Influência dos Parâmetros de Soldagem no Ensaio de Torção de Solda a Ponto em um Dispositivo Automatizado Recém Desenvolvido. **Soldagem e Inspeção**; São Paulo, v. 22, n. 2, Jun 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2202.11> >. Acesso em: 08 jun. de 2020.

AWS, 2005, **Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**, American Welding Society 3a Edição, USA.

AWS Welding Handbook, **Welding Process**, Volume 2, 8ª Edição – American Welding Society, 1991.

BENNET, Sean; NORMAN, Ian. **Heavy Duty Truck Systems**. 5. Ed. Nova Iorque 2011.

CALLISTER, Jr., William D., 1940 – **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma Abordagem Integrada**; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares; Revisão técnica Paulo Emílio Valadão de Miranda – 2ª Edição - Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos: planejamento, elaboração e apresentação**. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015. E-book. Disponível em: <www.univates.br/biblioteca>. Acesso em: 10 mai. 2020.

CHIAVERINI, Vicente. “**Aços e Ferros Fundidos**” – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª edição, 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.

FAIRCHILD, Douglas P.; KOO, Jayoung; BANGARU, Narashima-Rao V.; MACIA, Mario L.; BEESON, Danny L.; OZECKIN, Adnan. **Weld metals with superior low temperature toughness for joining high strength, low alloy steels**. EUA. ExxonMobil Upstream Research Company. US n. 6,565,678 B2, 20 mai. 2003. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/4f/70/c7/1b209b7c7e7f4a/US6565678.pdf>> Acesso em: 12 mai. 2020.

FORTES, C. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2005. (Relatório técnico de soldagem).

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KEELER Stuart; KIMCHI, Menachem. **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0**. Disponível em: <<https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

KIM, Sungil; CHOI, Shi-Hoon; KIM, Sung-Hwan; SEO, Seok-Jong; SUH, In-Shik. Influence of micro-texture on delamination of hot-rolled high strength low alloyed steel sheets. **HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015**. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-48767-0_28>. Acesso em 5 mar. 2020.

KOU, S., **Welding Metallurgy**. John Wiley e Sons, 2nd ed. Nova Jérσία, Estados Unidos, 2003.

LEOPARDI, M. T. **Metodologia da pesquisa na saúde**. 2^a ed. Florianópolis: UFSC, 2002.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: LS&TC - Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas, 2007.

LAKATOS, Eva M.; MARCONI, Marina de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. Disponível em: <http://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india/view>. Acesso em: 13 abr. 2020.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q.; **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2009.

MATLOCK, D.; Speer, J. Microalloying concepts and application in long products. **Materials Science and Technology**, 2009.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B.; **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2020.

MOREIRA, H. S.; **Estudo da Influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular**, Escola Politécnica – USP/SP – 2008.

PERINI, Felipe, G., **Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga Soldados**, Caxias do Sul – RS, 2008.

PEROVANO, Dalton G. **Manual de metodologia da pesquisa científica**. 1 ed. Curitiba: Intersaberes, 2016. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/37394/pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2020.

RODRIGUES, S. M., **Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas de aços de alta resistência mecânica**, Porto Alegre – RS, 2012.

SCOTTI, Américo.; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014. E-book. Disponível em: <https://www.artliber.com.br/amostra/soldagem_mig_mag.pdf>. Acesso em 08 jun. de 2020.

SILVA, Ana Carla S. et al. Aplicação da Metodologia para Qualificação de Procedimentos de Soldagem de Tubulações Industriais Conforme Parâmetros dos Códigos ASME B31.3 e ASME SECTION IX. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 24 out. 2019. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.23>>. Acesso em 10 abr. 2020.

SINGH, Mrityunjay.; OHJI, Tatsuki.; ASTHANA, Rajiv. **Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Material**. Elsevier, 2016. E-book.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982

TIAN, Yong.; WANG, Hong-tao.; LI, Yong.; WANG, Zhao-dong.; WANG, Guo-dong. The Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Microalloyed Steels after Ultra Fast Cooling. **Materials Research**, China, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0627>>. Acesso em: 05 mai. 2020.

WAINER, Emílio.; BRANDI, Sérgio D.; DE MELLO, Fábio D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1992.

WILLIAM C. L, **The Physical Metallurgy of Steels**, McGraw – Hill Book Company, New York, 1981, p. 189 – 201.